

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONCEPTION DES RÉSEAUX
D'ORDINATEURS SANS FIL

ABDERRAOUF BAHRI
DÉPARTEMENT DE GÉNIE INFORMATIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INFORMATIQUE)

NOVEMBRE 2003

© BAHRI Abderraouf, 2003



National Library
of Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

Acquisitions et
services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 0-612-89175-5

Our file Notre référence

ISBN: 0-612-89175-5

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this dissertation.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de ce manuscrit.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the dissertation.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

CONCEPTION DES RÉSEAUX
D'ORDINATEURS SANS FIL

présenté par : BAHRI Abderraouf

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. PIERRE Samuel, Ph.D., président

M. CHAMBERLAND Steven, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. QUINTERO Alejandro, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord remercier mon directeur de recherche M. Steven Chamberland pour son encadrement, sa bienveillance et ses conseils avisés. Je suis très reconnaissant à toute ma famille, petits et grands, pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements continuels, même s'ils sont à des milliers de kilomètres. Ils ont toujours su m'apporter le réconfort et le courage dans les heures difficiles. Je ne passe pas sous silence la grande place de mes chers disparus sans lesquels je ne serai pas là où je suis aujourd'hui. Je garderai toujours d'eux un souvenir merveilleux et j'aurais tant aimé qu'ils soient présents. Je ne pourrai pas oublier toutes les personnes qui m'entourent aussi bien ici qu'en Tunisie. Leur présence et leur soutien étaient très précieux. Je remercie sincèrement aussi le corps professoral et le personnel de l'École Polytechnique de Montréal ainsi que celui du centre de recherche sur les transports pour leur compétence et leur professionnalisme.

À tous un grand merci du fond du cœur.

RÉSUMÉ

Les réseaux locaux sans fil sont de plus en plus populaires aujourd'hui. Cependant leur planification est complexe. Il existe plusieurs aspects dont il faut tenir compte lors de la conception. Certains de ces aspects s'opposent et il faut trouver un compromis selon les priorités du planificateur du réseau. L'objectif premier de ce mémoire est l'élaboration d'une technique de planification basée sur une science "exacte" qui minimise le coût d'un réseau local sans fil. Cette technique doit rester générique et donc valable pour tous les standards disponibles. Elle doit assurer entre autre une qualité de service basée sur l'intégration de tous les clients au réseau ainsi que la garantie d'un débit minimal pour chacun de ces clients. Nous prenons comme hypothèses, la connaissance de l'emplacement en trois dimensions des clients et des sites potentiels, la valeur du débit minimal à garantir à chaque client ainsi que les paramètres du standard à utiliser comme les capacités disponibles, les puissances de transmission possibles et le niveau minimal du rapport signal sur bruit nécessaire. Pour concevoir notre technique de planification, nous avons posé un modèle mathématique avec variables entières basé sur les différentes contraintes régissant la planification des réseaux locaux sans fil. Deux heuristiques sont proposées pour trouver de bonnes solutions au modèle. La première est une heuristique initiale énumérative. La deuxième est basée sur la recherche avec tabous qui part de la solution trouvée par l'heuristique initiale et tente de l'améliorer. En plus de ces deux fonctions, nous proposons une borne inférieure basée sur une relaxation du modèle mathématique. Le but de cette dernière est d'évaluer la qualité des solutions trouvées par les deux heuristiques précédentes. Plusieurs instances de problèmes ont été générées dans le but de réaliser des simulations. L'analyse des résultats a confirmé la validité du modèle. La plupart de ces résultats attestent du bien fondé de notre approche. Cependant certains de ces résultats ont montré l'existence de quelques limites. En effet nous avons constaté que dans des situations où

les interférences sont importantes, la borne inférieure, tout en restant valide, manquait de raffinement. Ce qui ne nous permettait pas d'évaluer, dans ces situations, la qualité des solutions trouvées par les heuristiques. Nous proposons une nouvelle approche qui, à notre connaissance et au moment de la rédaction de ce mémoire, n'a pas été encore abordée. Cette approche est basée sur l'assurance de l'intégration de tous les clients au réseau ainsi que sur la garantie d'un débit minimal pour chacun de ces clients. Pour ce faire, nous nous sommes fondés sur la gestion des puissances de transmission ainsi que sur celle des interférences. Ceci a été réalisé par une bonne affectation des canaux et par le contrôle de la puissance de transmission de chacun des APs sélectionnés. Cette technique n'est pas spécifique à un standard donné. En effet, nous avons réalisé des simulations pour plusieurs d'entre eux. Comme nous l'avons expliqué, ce travail n'est pas parfait. C'est la raison pour laquelle nous avons proposé des pistes pour orienter les futurs travaux dans le domaine.

ABSTRACT

The number and the popularity of the wireless local area network (WLAN) are growing up. Unluckily, the planning techniques of those networks use often a try-error ways more than exact science. Planning a WLAN is difficult and complex. The network planner has to find a trade-off between their priorities. The goal of this work is the development of a planning methodology that minimise the cost of a wireless LAN based on operations research techniques. This methodology should be independent of the WLAN standard used in the network. It must consider all clients and guarantee for every one a minimal rate. To accomplish this, we have to make some assumptions. The first one is the knowledge of the location of the clients and potential sites. The second is the acquaintance of the minimal rate to be guaranteed to every client. The last assumption is the knowledge of the standard's parameters to be employed in the network, like the offered rates, the available levels of power and the minimum signal to noise ratio necessary for each rate. To build our methodology, we formulate an integer mathematical model based on the constraints which have to be respected by the network planner. Since the problem is NP-hard, we have concentrated our efforts on the development of heuristics. The first one is an initial heuristic that enumerates feasible solutions. The second one, based on the tabu search principle, improves the solution of the initial heuristic. We also propose a lower bound to test the efficiency of the heuristics. This bound is based on a linear relaxation version of the mathematical model. Many instances are randomly generated for the tests. The results demonstrate the validity of our model. Some results show the existence of a few limitations. For instance, it is proved that our lower bound, still valid, is not efficient when the interferences are important. As a result, in those situations, we will not be able to evaluate the solution's quality of the proposed heuristics. We can easily conclude that our technique is a good one even though it is not perfect. That is why we formulate some propositions to guide

future works. It should be noted that our heuristics are not specific to a given WLAN standard.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
Liste des figures	xii
Liste des tableaux	xiv
Liste des sigles et abréviations	xv
Liste des annexes.....	xviii
CHAPITRE 1 Introduction	1
1.1 Éléments de la problématique	2
1.2 Objectif de la recherche	3
1.3 Esquisse de la méthodologie	3
1.4 Plan du mémoire	4
CHAPITRE 2 Les réseaux locaux sans fil	5
2.1 Émergence des WLANs	5
2.2 Évolution	5

2.3 Avantages et inconvénients.....	6
2.4 Composantes d'un WLAN.....	9
2.5 Fonctionnement.....	11
2.6 Architectures	13
2.6.1 Réseaux en mode infrastructure	14
2.6.2 Réseaux en mode ad-hoc.....	16
2.6.3 Réseaux hybrides	17
2.7 Standards existants.....	19
2.7.1 IEEE 802.11	19
2.7.2 HiperLAN	20
2.7.3 IEEE 802.15.....	21
2.8 Étude de la propagation RF à l'intérieur d'un édifice.....	21
2.9 Réglementation	25
Chapitre 3 Design et déploiement.....	28
3.1 Revue de littérature	28
3.2 Modélisation.....	32
3.2.1 Considérations.....	32
3.2.2 Notation.....	33
3.2.3 Le modèle A.....	34
3.2.4 Le modèle B.....	38
3.2.5 Recherche avec tabous.....	41
3.2.6 Heuristique initiale.....	44
3.3 Algorithme de coloration de sommets d'un graphe	46

3.4 Caractérisation de la propagation dans le milieu	47
CHAPITRE 4 Résultats et analyse.....	50
4.1 Implantation et interprétation.....	50
4.2 Plan d'expérience.....	52
4.3 Paramètres et données des simulations	53
4.4 Résultats et analyses.....	58
CHAPITRE 5 Conclusions	73
5.1 Synthèse des travaux	73
5.2 Limitation des travaux.....	74
5.3 Indications pour les futures recherches	75
BIBLIOGRAPHIE	76
ANNEXE Le standard IEEE 802.11	79

Liste des figures

Figure 2.1 Intégration des WLANs dans le modèle OSI	12
Figure 2.2 Réseau en mode infrastructure BSS	15
Figure 2.3 Réseau en mode infrastructure ESS	16
Figure 2.4 Réseau en mode ad-hoc	17
Figure 2.5 Réseau hybride.....	18
Figure 3.1 Découpage de la zone de couverture en carrés	39
Figure 3.2 Algorithme TS-PA.....	44
Figure 3.3 Algorithme IH-PA	45
Figure 3.4 Algorithme Dsaturn	47
Figure 4.1 Diagramme de blocs de la méthodologie utilisée	54
Figure 4.2 Distribution de la capacité dans le IEEE 802.11a	55
Figure 4.3 Distribution de la capacité dans le IEEE 802.11b	56
Figure 4.4 Heuristique initiale, recherche avec tabous et borne inférieure pour une capacité de 6 Mbps et 400 sites potentiels	59
Figure 4.5 Heuristique initiale, recherche avec tabous et borne inférieure pour une capacité de 18 Mbps et 400 sites potentiels	60
Figure 4.6 TS-PA :puissance totale transmise par canal pour 400 sites potentiels.....	62
Figure 4.7 Temps de calcul de l'heuristique initiale pour une capacité de 18 Mbps et 400 sites potentiels	63
Figure 4.8 Temps de calcul de la recherche avec tabous pour une capacité de 18 Mbps et 400 sites potentiels	63
Figure 4.9 Temps de calcul pour une capacité de 18 Mbps et 400 sites potentiels	64
Figure 4.10 TS-PA :coût du réseau pour différentes capacités et 400 sites potentiels	65
Figure 4.11 TS-PA :utilisation des canaux pour différentes capacités	65

Figure 4.12 TS-PA :puissance de transmission moyenne par AP et par canal	66
Figure 4.13 TS-PA :coût du réseau pour différents édifices de même superficie pour une capacité de 18 Mbps et 400 sites potentiels	67
Figure 4.14 TS-PA :coût du réseau avec divers protocoles	68
Figure 4.15 TS-PA :coût du réseau pour différents débits garantis avec une capacité de 18 Mbps et 400 sites potentiels	70
Figure 4.16 Effet du nombre maximal d'itérations	71
Figure A.1 Interaction entre les entités concernées par le service	84
Figure A.2 Illustration du SS	85
Figure A.3 Positionnement des canaux DSSS	86
Figure A.4 Fonctionnement du DSSS.....	87
Figure A.5 Effet du DSSS sur le signal	87
Figure A.6 Transmission utilisant FHSS	88
Figure A.7 Canaux OFDM.....	89
Figure A.8 Mécanisme utilisé dans CSMA/CA.....	94
Figure A.9 Illustration du mécanisme du backoff.....	95
Figure A.10 Échanges entre une source et sa destination	96
Figure A.11 Paquet RTS	96
Figure A.12 Composantes du champ Frame Control.....	97
Figure A.13 Format d'un paquet CTS	98
Figure A.14 Format d'un paquet de donnée	98
Figure A.15 Format d'un paquet ACK	99
Figure A.16 Incrémentation de la valeur de CW	101
Figure A.17 Procédure d'accès au médium partagé.....	102

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Protocoles de communication de 802.11.....	20
Tableau 4.1 Débit utile partagé	56
Tableau 4.2 Nombre de clients pris en charge pour un débit garanti de 500 Kbps	57
Tableau 4.3 Rapport signal sur bruit minimal pour différentes capacités.....	57
Tableau 4.4 Puissance minimale pour l'association et portée maximale d'un AP	58
Tableau A.1 Famille du protocole 802.11.....	82
Tableau A.2 Champs d'adresses	99

Liste des sigles et abréviations

ACK	Acknowledgement
AP	Access Point
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BSC	Backtracking Sequential Coloring
BSS	Basic Service Set
BSSID	Basic Service Set Identifier
CNR	Cahier des charges sur les Normes Radioélectriques
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection
CTS	Clear To Send
CW	Contention Window
DA	Destination Address
DCF	Distributed Coordination Function
DIFS	DCF Inter Frame Space
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EIFS	Extended Inter Frame Space
ESS	Extended Service Set
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
FCS	Frame Check Sequence
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FFT	Fast Fourier Transformation
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
HiperLAN	High Performance Local Area Network

IBSS	Independent Basic Service Set
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IR	Infrared
ISM	Industrial, Scientific and Medical radio spectrum
LAN	Local Area Network
LLC	Link Layer Control
MAC	Media Access Control
MLME	MAC Layer Management Entity
MSDU	MAC Service Data Unit
NACK	Negative Acknowledgement
NAV	Network Allocation Vector
NIC	Network Interface Card
NP	Non Polynomial
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSI	Open Systems Interconnection
PCF	Point Coordination Function
PDA	Personal Digital Assistant
PHY	Physique
PLCP	Physical Layer Convergence Procedure
PLME	Physical Layer Management Entity
PMD	Physical Medium Dependent
RA	Receiver Address
RF	Radio Frequency
RTS	Ready To Send
SA	Source Address
SAP	Service Access Point
SIFS	Short Inter Frame Space
SS	Spread Spectrum
TA	Transmitter Address

TS	Tabu Search
WEP	Wired Equivalent Privacy
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

Liste des annexes

ANNEXE Le standard IEEE 802.11.....	79
-------------------------------------	----

CHAPITRE 1

Introduction

Les réseaux locaux sans fil ont fait leur apparition dans les années quatre-vingt-dix. Les premières standardisations ont été réalisées dans la deuxième moitié de cette décennie. Aujourd'hui plus de 5% des ordinateurs reliés à des réseaux, approximativement 10 millions, utilisent la technologie sans fil Wi-Fi (Wireless Fidelity). Le Wi-Fi est une organisation internationale à but non lucratif créée en 1999 pour certifier l'interopérabilité des produits basés sur le standard 802.11b. Ce dernier est le standard le plus populaire aujourd'hui. Après enquête sur le marché, Gartner/Dataquest (voir Haines (2003)) estime que le nombre d'utilisateurs réguliers de WLAN passera de 4,2 millions en 2003 à 31 millions en 2007. De plus, selon la même source, 30% des ordinateurs à usage professionnel seront équipés de carte réseaux Wi-Fi en 2005. La majorité des grands fabricants de matériels informatiques offrent des équipements sans fil. De nos jours, les réseaux locaux sans fil présentent un moyen rentable pour interconnecter les ordinateurs. Ainsi plusieurs corporations et industries optent pour cette technologie. De plus, on retrouve ce genre de réseaux dans des environnements très variés comme des entreprises, aéroports, hôpitaux, écoles, hôtels, cafés, librairies, etc.

Aujourd'hui, plus de 600 millions de personnes possèdent un téléphone cellulaire. Les nouvelles générations de réseaux cellulaires tentent d'offrir, en plus de la conversation vocale, d'autres services comme la transmission de données incluant les services multimédias et l'accès à Internet. Cependant, les appareils proposés sont de plus en plus petits et souffrent encore de plusieurs problèmes. On peut citer, le manque de maniabilité, la qualité de l'affichage, la puissance de traitement, etc. Aujourd'hui, de nouveaux réseaux publics Wi-Fi voient le jour pour offrir des services de transmissions de données. On peut citer l'exemple du réseau de la RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens) qui sera déployé dans les principales stations de métro de Paris.

Le présent chapitre décrit le contexte de notre projet et présente les éléments de la problématique, par la suite, il précise les objectifs de la recherche, définit la méthodologie adoptée et enfin expose le plan du mémoire.

1.1 Éléments de la problématique

Actuellement, le déploiement des réseaux d'ordinateurs sans fil se fait d'une manière empirique. Le placement des points d'accès au réseau est réalisé beaucoup sur la base de l'expérience et par essais-erreurs. De plus, ce que les planificateurs proposent aujourd'hui est la réalisation d'une couverture totale ou partielle du réseau. Les interférences, la qualité de service, ainsi que le comportement du réseau sous une sollicitation importante ne sont pas encore pris en compte. Aussi, d'autres aspects sont inexistantes dans la planification de ces réseaux. On peut citer les points suivants.

- La garantie d'un débit minimal par client : lorsqu'un client se connecte au réseau, le débit qui lui est offert n'est pas garanti. En plus, les clients qui étaient déjà connectés devront partager la largeur de bande et voir ainsi leur débit diminuer.
- Le choix du standard à utiliser : il existe plusieurs standards disponibles sur le marché. Aujourd'hui, lors de la planification, il n'y a pas véritablement de prise en compte de l'impact du standard sur le coût du réseau. On se fonde beaucoup plus sur les connaissances et l'expérience du planificateur.
- la gestion des puissances des transmissions : une bonne gestion de la puissance des transmissions permet de réaliser une couverture adéquate du réseau tout en minimisant les interférences.
- la sélection de la capacité d'opération des points d'accès : il existe un lien étroit entre la capacité d'un point d'accès et sa portée opérationnelle. Les aspirations de ces deux aspects sont opposées. Il faut donc trouver le bon équilibre entre les deux. Ceci doit se faire d'une manière individualisée pour chaque réseau.

1.2 Objectif de la recherche

L'objectif principal de notre projet est de concevoir une technique de planification des réseaux d'ordinateurs sans fils. Cette technique devra prendre en ligne de compte les points suivants.

- Assurer à tous les clients un accès au réseau.
- Garantir à chaque client un débit minimal.
- Réaliser une affectation des canaux pour diminuer les interférences.
- Gérer les puissances de transmissions.
- Minimiser le coût du réseau
- Être générique et donc utilisable pour tous les standards disponibles.

Nous devons nous donner les moyens de vérifier la validité et la qualité de cette technique.

1.3 Esquisse de la méthodologie

Pour réaliser notre technique de planification des réseaux d'ordinateurs sans fil, nous devons tout d'abord élaborer un modèle mathématique qui englobera toutes les contraintes relatives à la planification. Ce modèle devra être posé de sorte qu'il minimise le coût du réseau. Les entrées de ce modèle seront la localisation des clients et des sites potentiels où des points d'accès pourront être installés, le standard utilisé ainsi que le choix des capacités. Une résolution de ce modèle devra indiquer la localisation des points d'accès. Elle précisera aussi la puissance de transmission de chacun de ces points d'accès ainsi que son canal d'opération et enfin elle calculera le coût total du réseau.

Deux heuristiques seront proposées pour trouver de bonnes solutions au modèle. La première, une heuristique initiale, permettra de trouver une bonne solution de départ.

Cette solution sera améliorée par la seconde heuristique basée sur le principe de la recherche avec tabous. Nous implanterons aussi une borne inférieure basée sur une relaxation linéaire de certaines contraintes du modèle. Cette borne servira à donner un ordre de grandeur du coût du réseau et d'estimer la qualité de la solution proposée par les heuristiques.

Par la suite, nous générerons plusieurs fichiers tests qui considèrent certains paramètres tel que le nombre de clients, le nombre de sites potentiels et l'architecture de l'édifice où le réseau sera déployé. En suite, nous élaborerons un plan d'expérience et nous effectuerons les tests nécessaires pour vérifier la validité et la qualité des heuristiques.

1.4 Plan du mémoire

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres. Ce premier chapitre d'introduction est une brève description du contexte, de la problématique, de la méthodologie et du plan de ce mémoire. Le deuxième chapitre traitera des réseaux locaux sans fil d'une façon générale. On y présentera des aspects comme leur évolution, leur fonctionnement, leurs architectures et les standards disponibles. Dans le troisième chapitre, nous examinerons le design et le déploiement de ces réseaux. Nous présenterons une revue de littérature sur les travaux effectués dans ce domaine et nous proposerons notre modèle mathématique ainsi qu'une variante de ce modèle. Nous détaillerons aussi, dans ce même chapitre, les étapes et heuristiques proposées. Le quatrième chapitre sera consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats obtenus. On y exposera aussi le plan d'expérience ainsi que les détails de l'implantation des heuristiques. Le dernier chapitre conclura le mémoire en synthétisant les principaux aspects de ce travail et en révélant les limitations de ce dernier. Ce chapitre contiendra aussi des propositions pour l'orientation des futures recherches. Pour ne pas alourdir ce mémoire, nous avons annexé un descriptif du fonctionnement du standard 802.11 à l'intention des personnes qui désireront avoir plus d'informations et de précisions sur ce standard.

CHAPITRE 2

Les réseaux locaux sans fil

2.1 Émergence des WLANs

L'émergence des réseaux sans fil a permis de répondre aux besoins actuels de mobilité dans les réseaux informatiques. De plus, la création de standards et les avancées technologiques dans les domaines aussi variés que celui du codage, de la compression, de la sécurité et des antennes, ont rendu les équipements de plus en plus abordables et de plus en plus performants. Les réseaux locaux sans fil ou WLANs (Wireless Local Area Networks) ont été introduits en premier par les gouvernements pour des besoins militaires. Le monde des affaires a rapidement suivi le pas en intégrant ces technologies à ses infrastructures. D'autres secteurs comme l'éducation et les services ont profités des avantages des WLANs. En effet, pratiquement toutes les universités possèdent leur propre réseau sans fil, tout comme plusieurs aéroports, restaurants, cafés, etc. Ces derniers proposent à leurs clients l'accès à Internet via leur WLAN. Cet engouement s'est propagé aux résidences privées car il n'est pas rare de trouver dans des domiciles des réseaux sans fil. La standardisation des protocoles est assez récente. Cependant, ce genre de réseau est actuellement très populaire et est voué, selon les spécialistes à une présence prépondérante en témoigne le grand nombre de publicités et les prix très abordables des équipements.

2.2 Évolution

Depuis les premiers WLANs, les technologies n'ont cessé d'évoluer pour donner plus de débit, plus de sécurité et plus d'efficacité. Les premiers standards sont très

récents, en fait, ils datent du milieu des années quatre-vingt dix mais plusieurs groupes de travail se sont penchés sur le sujet bien avant. Ces groupes sont essentiellement européens et nord-américains. Ils se font concurrence et leurs protocoles ne sont pas compatibles. En Europe, l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) a adopté un protocole qui spécifie un débit allant jusqu'à 20 Mbps alors que l'IEEE (Institute for Electrical and Electronical Engineering) a opté pour un protocole utilisant des débits allant plutôt jusqu'à 2 Mbps. Aujourd'hui, les deux groupes ont amélioré leurs protocoles respectifs et les débits actuels peuvent atteindre 54Mbps. Dans un futur très proche, on prévoit des débits pouvant atteindre 154 Mbps. Les fonctionnalités d'encryption et d'authentification ont été améliorées depuis les premières versions des standards pour augmenter la sécurité dans les WLANs. Les gouvernements autorisent l'utilisation des WLANs dans des bandes de fréquences publiques, c'est-à-dire sans licences.

2.3 Avantages et inconvénients

Comme toutes technologies, les WLANs présentent des avantages et des inconvénients. Pour expliquer leur popularité grandissante, nous avons relevé les points suivants :

- **La flexibilité.** Les WLANs offrent une plus grande flexibilité quant à leur intégration, déploiement et possibilité d'expansion que les réseaux locaux filaires. Dans le cas de ces derniers, il faut créer un chemin physique entre chaque point du réseau pour réaliser la connectivité. Cet aspect prend toute sa mesure dans la partie accès du réseau. En effet, il faut s'assurer que tous les usagers possèdent un lien physique afin qu'ils soient connectés au réseau. Etant donné un nombre important d'utilisateurs, le nombre de liens d'accès nécessaire doit être en conséquence et cela impliquerait des coûts importants à investir dans l'infrastructure. Dans un WLAN, l'accès se fait au niveau des points d'accès ou

APs (Access Points) qui peuvent prendre en charge un nombre relativement important d'utilisateurs. Dans le cas de l'installation d'un LAN (Local Area Network) câblé dans un bâtiment non aménagé, les coûts liés à l'installation du câblage peuvent être prohibitifs en plus du temps nécessaire pour réaliser ces travaux durant lequel l'activité des utilisateurs est limitée. Si l'administrateur opte plutôt pour un WLAN, les dépenses de câblage ainsi que le temps requis se trouveraient grandement diminués. Dans la perspective d'expansion du réseau, les mêmes problèmes dans le cas du LAN câblé surviendraient concernant l'installation des fiches d'accès clients. Ceci est limité avec l'installation de nouveaux APs dans un WLAN.

- **La mobilité.** C'est l'avantage le plus important des WLANs. La mobilité implique le libre mouvement de l'utilisateur sans avoir un fil de connexion qui limiteraient son déplacement. Cette mobilité est effective dans toutes les zones couvertes par le réseau. Un autre point à considérer dans la mobilité est la mobilité du réseau. En effet, il est aisé de déplacer une partie ou la totalité du WLAN d'un bâtiment à un autre sans se soucier de retrouver les connexions et l'infrastructure filaire de l'emplacement originel car par définition, un WLAN est un ensemble de machines qui communiquent sans câblage.
- **La productivité.** Grâce aux avantages cités plus haut, on peut affirmer que la productivité des utilisateurs utilisant un WLAN se trouve grandement améliorée. En effet, le gain de temps, le libre choix de l'emplacement le plus adéquat pour effectuer un travail, la grande flexibilité et les nombreux services offerts par un réseau sans fil présentent à l'utilisateur un environnement de travail propice à la croissance de sa productivité.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les principaux inconvénients que nous avons relevés quant au choix de l'utilisation d'un WLAN à la place d'un réseau filaire câblé. Ces lacunes ont été cernées au moment où ce travail a été réalisé.

- **La qualité de service.** À cause du concept même de la communication sans fil, les transmissions sont souvent sensibles aux interférences aussi bien internes qu'externes au réseau. Les pertes de paquets et les collisions ne sont pas rares. De plus, le signal reçu n'est pas toujours stable car le déplacement même des usagers, ne serait ce que de quelques centimètre (l'équivalent de la moitié de la longueur d'onde qui est de l'ordre de 3 cm) contribuerait à changer complètement les caractéristiques du signal, cela est aussi valable pour le changement d'orientation de la machine sans fil et ce même de quelques degrés. Dans un WLAN, si un nouvel usager s'associe à un AP et initie une communication, les débits utilisés précédemment par les autres usagers s'en trouvent affectés et dans certains cas fortement dégradés. La plupart de ces aspects discutés sont pratiquement inexistantes dans les LANs câblés car ils sont majoritairement commutés. Aussi, pour ces derniers, les débits disponibles sont de l'ordre de 100 Mbps et même de 1000 Mbps alors que le mieux qu'on peut avoir aujourd'hui dans des WLANs est 54 Mbps.
- **L'autonomie.** Cet aspect concerne les machines qui utilisent les batteries comme source d'alimentation, celle-ci est reliée aux performances des batteries et aux applications utilisées par l'utilisateur. L'autonomie a donc des limites et le besoin répété de recharge des batteries pourrait présenter un handicap sérieux pour les WLANs.
- **La sécurité.** C'est le point le plus critiqué et le plus discuté concernant les WLANs. La grande facilité d'accès aux transmissions pose de nombreuses interrogations quant à la sécurité de ce genre de réseau. La possibilité

d'interception des transmissions augmente les risques d'accès et de détournement de l'information. Dans un LAN câblé, pour pouvoir accéder à cette information, il faudrait être connecté au segment du réseau concerné. Ceci implique la présence physique de l'intrus à l'intérieur de l'édifice ce qui peut être difficile. De plus, dans un WLAN, un intrus peut accéder au réseau via un AP, s'il réussit à déjouer les dispositifs de sécurités et ceci tout en étant à l'extérieur de l'édifice en question. Dans ce cas, il pourra se faire passer pour un usager légitime et avoir accès à des données confidentielles.

- **La portée.** Les distances nécessaires pour être associé à un AP ne sont pas illimitées. Elles dépendent aussi bien du débit demandé que de la propagation du signal. De plus, ces limites ne sont pas visibles, il suffit de faire un pas dans la mauvaise direction pour être complètement déconnecté du réseau et devoir rechercher un emplacement pour établir une nouvelle connexion. La réalisation d'une bonne couverture radio incombe au planificateur du réseau.

2.4 Composantes d'un WLAN

Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter les principales composantes des WLANs. Quelques-unes d'entre elles peuvent être facultatives.

- **Les stations sans fil.** C'est l'ensemble des stations qui ont la possibilité d'initier une communication ou de répondre à une requête. Ces stations peuvent être mobiles ou fixes sans pour autant utiliser les liaisons filaires pour communiquer. On peut citer les ordinateurs portables et de bureau, ainsi que les PDAs (Personal Digital Assistant), les serveurs et les concentrateurs sans fils. Toutes ces stations doivent posséder un NIC (Network Interface Card) pour pouvoir faire partie du WLAN et communiquer.

- **Les points d'accès ou APs.** Ce composant est facultatif dans certains types d'architecture. Il représente le point central du réseau sans fil. Un AP gère les machines qui lui sont associées et leur permet de communiquer. Pour cela, il émet à des intervalles réguliers des paquets comportant son adresse MAC (Medium Access Control) et l'identificateur du réseau pour annoncer sa présence, synchroniser les stations qui lui sont associées et pour permettre aux différentes machines sans fil de mesurer la puissance et la qualité de son signal pour une éventuelle association ou dissociation. Un AP est généralement relié à un LAN dans le but de permettre aux stations sans fil de communiquer avec le reste du réseau et d'accéder à l'Internet. Un AP peut remplir les fonctions de passerelle, de concentrateur, de commutateur et même de routage. Ces quelques fonctions dépendent des options qui existent dans le produit ainsi que de sa configuration.
- **Le médium.** C'est la liaison physique qui relie les stations et leur permet de communiquer. Dans le cas d'un WLAN, le médium est représenté par l'air libre au travers duquel, les ondes électromagnétiques sont émises, se propagent puis sont reçues.
- **Les antennes.** C'est le composant physique qui convertit le signal électrique en onde électromagnétique et inversement. Une onde électromagnétique reçue à une antenne, cause un flot d'électrons dans le conducteur de l'antenne, ce qui produit un courant et génère ainsi le signal électrique. D'un autre côté, si on applique un courant à une antenne, on crée un champ électrique. Ce dernier est fonction du courant appliqué. La variation du champ électrique engendre le champ magnétique induisant la propagation d'une onde électromagnétique. Les dimensions de l'antenne doivent être adaptées à la longueur d'onde opérationnelle utilisée. Selon l'application, on peut choisir une antenne

omnidirectionnelle ou une antenne directionnelle. La première donne la possibilité d'émettre et de recevoir un signal de n'importe quelle direction ce qui augmente la zone de couverture au tour de l'antenne. La deuxième a pour but de concentrer la communication suivant une direction donnée ce qui a pour effet d'augmenter la portée opérationnelle dans la direction en question. L'antenne directionnelle inclue deux types. Le premier est l'antenne bidirectionnelle concentrant les communications suivant deux directions opposées. Elle est utile dans les emplacements tels que les corridors. La deuxième est l'antenne unidirectionnelle qui concentra les communications suivant une direction donnée. Elle est utilisée pour des communications point à point. Les antennes diffèrent par leur patron de propagation et leur gain. Les NICs comportent en général une antenne intégrée constituée de circuits passifs imprimés alors qu'un AP dispose par contre d'une antenne extérieure qui offre des plus grandes performances que celles qui sont intégrées.

2.5 Fonctionnement

Il y a des différences majeures entre les WLANs et le LANs câblés qui résident dans les deux premières couches du modèle OSI : la couche liaison et la couche physique. Le fonctionnement des couches supérieures reste le même pour les deux types de réseau. La figure 2.1 montre l'intégration des WLANs dans le modèle OSI. Dans la couche physique, la transmission de données se fait, dans les LANs câblés, sous formes de signaux électriques à travers les câbles. Dans les WLANs, la transmission se fait plutôt sous forme d'une onde électromagnétique. Les distances parcourues par cette onde dépendent des caractéristiques de la longueur d'onde, des obstacles rencontrés et des interférences présentes dans le milieu de propagation. La couche physique de l'émetteur transforme le signal électronique reçu des couches supérieures en onde électromagnétique alors que son vis à vis au récepteur recouvre le signal électronique à

partir de l'onde reçue. Aujourd'hui, les ondes utilisées pour les transmissions dans les WLANs opèrent spécifiquement dans trois spectres électromagnétiques.

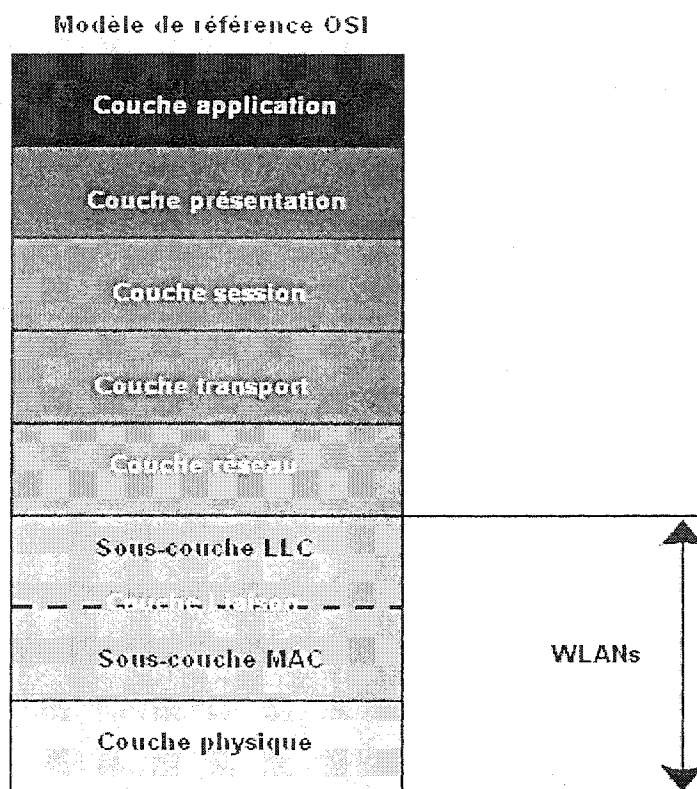


Figure 2.1 Intégration des WLANs dans le modèle OSI

- **Infrarouge.** Ce spectre est situé entre les fréquences 9 kHz et 300 kHz. Les dispositifs utilisés dans ce type de communication sont peu coûteux et les débits offerts peuvent être assez élevés. Le récepteur doit faire face à l'émetteur pour recueillir la transmission, c'est-à-dire qu'il ne devrait avoir aucun obstacle séparant les deux entités. Ceci implique une limitation aussi bien dans les déplacements que dans l'utilisation. Cependant, cet aspect peut jouer un rôle positif quant à la sécurité : vu que le signal ne peut pas traverser les obstacles communs, l'interception de ce dernier par une tierce personne, se trouvant, par exemple, à l'extérieur de l'édifice, est impossible. La communication dans le

spectre infrarouge souffre beaucoup du problème d'interférences. En effet, la lumière peut dégrader significativement la qualité des transmissions.

- **Micro-ondes.** Ce spectre est situé bande 5.8 GHz. Il permet des débits très élevés. Cependant, la puissance d'émission dans ce spectre est très restreinte par la réglementation. La plupart des applications utilisées dans cette bande sont des applications commerciales.
- **Radiofréquence.** C'est le spectre le plus populaire. Les bandes allouées dans la plupart des pays sont les bandes 2.4 GHz ISM (Industriel, Scientific and Medical band) et les bandes 5 GHz. Par contre, les seuls modes autorisés dans ce spectre pour la communication des WLANs sont à spectres étalés (voir annexe).

Concernant la couche liaison, il est normal que les protocoles utilisés dans les LANs câblés et les WLANs diffèrent. En effet, le rôle de la couche liaison est d'adapter la transmission des données au médium physique. Ce dernier n'étant pas le même dans les deux types de réseau, les protocoles concernés doivent être ajustés à chaque réalité.

2.6 Architectures

Lorsqu'on traite des WLANs, on ne peut s'exprimer qu'en terme d'architecture. La topologie des WLANs est dynamique dû à la mobilité de certains éléments du réseau. On ne peut définir la topologie qu'en intégrant la dimension temporelle. En ce qui a trait à l'architecture des WLANs, on distingue trois grandes familles :

- Les réseaux en mode infrastructure
- Les réseaux en mode ad-hoc
- Les réseaux hybrides

Les deux premières architectures sont très populaires et sont supportées par la plupart des standards WLANs. Quant à la troisième, son utilisation reste encore très limitée.

2.6.1 Réseaux en mode infrastructure

C'est l'architecture la plus utilisée dans les WLANs. Elle implique l'existence d'au moins un élément appartenant à l'infrastructure. Cet élément est l'AP. Dans le réseau, on peut avoir plusieurs APs, la zone de couverture serait donc découpée en plusieurs cellules, chacune gérée par un unique AP. Pour implanter cette architecture, le réseau devrait comporter au moins un AP. L'avantage tiré est que le WLAN peut être relié à un LAN câblé. Cette connexion se fait via les APs. Cependant, toutes les communications des stations sans fil devront passer par l'AP. Cela implique que deux stations d'une même cellule, même très proches l'une de l'autre, et qui voudraient communiquer, devraient quant même passer par leur AP. Dans l'architecture en mode infrastructure, on distingue deux variantes, le BSS (Basic Service Set) et l'ESS (Extended Service Set).

2.6.1.1 BSS

Le BSS est une architecture qui consiste en un ensemble de cellules, ou BSS, disjointes. C'est-à-dire qu'aucune zone de couverture d'un AP ne chevauche celle d'un autre. Donc, dès qu'une station franchit la frontière de sa cellule, elle est déconnectée du réseau. Ce genre d'architecture est utilisé lors de la réalisation d'une couverture restreinte à seulement quelques zones d'intérêt. La figure 2.2 illustre bien ce que nous venons de décrire.

2.6.1.2 ESS

L'ESS est une architecture qui consiste en une série de cellules d'un même réseau qui se chevauchent. Elle permet à un usager de se déplacer d'une cellule à une autre tout en restant connecté au réseau et ce d'une façon transparente. Dans ce genre

d'architecture, un important travail portant sur la limitation des interférences devrait se faire. En effet, le nombre de canaux de communication disponibles étant fixe dans tous les standards, et les zones de couverture des APs se chevauchant, il faudrait bien gérer le patron des fréquences en assignant adéquatement les canaux aux APs et en tirant profit de la réutilisation des canaux afin d'espacer le plus possible les cellules opérant dans le même canal et diminuer ainsi les interférences dans le réseau. La figure 2.3 présente un réseau en mode infrastructure ESS.

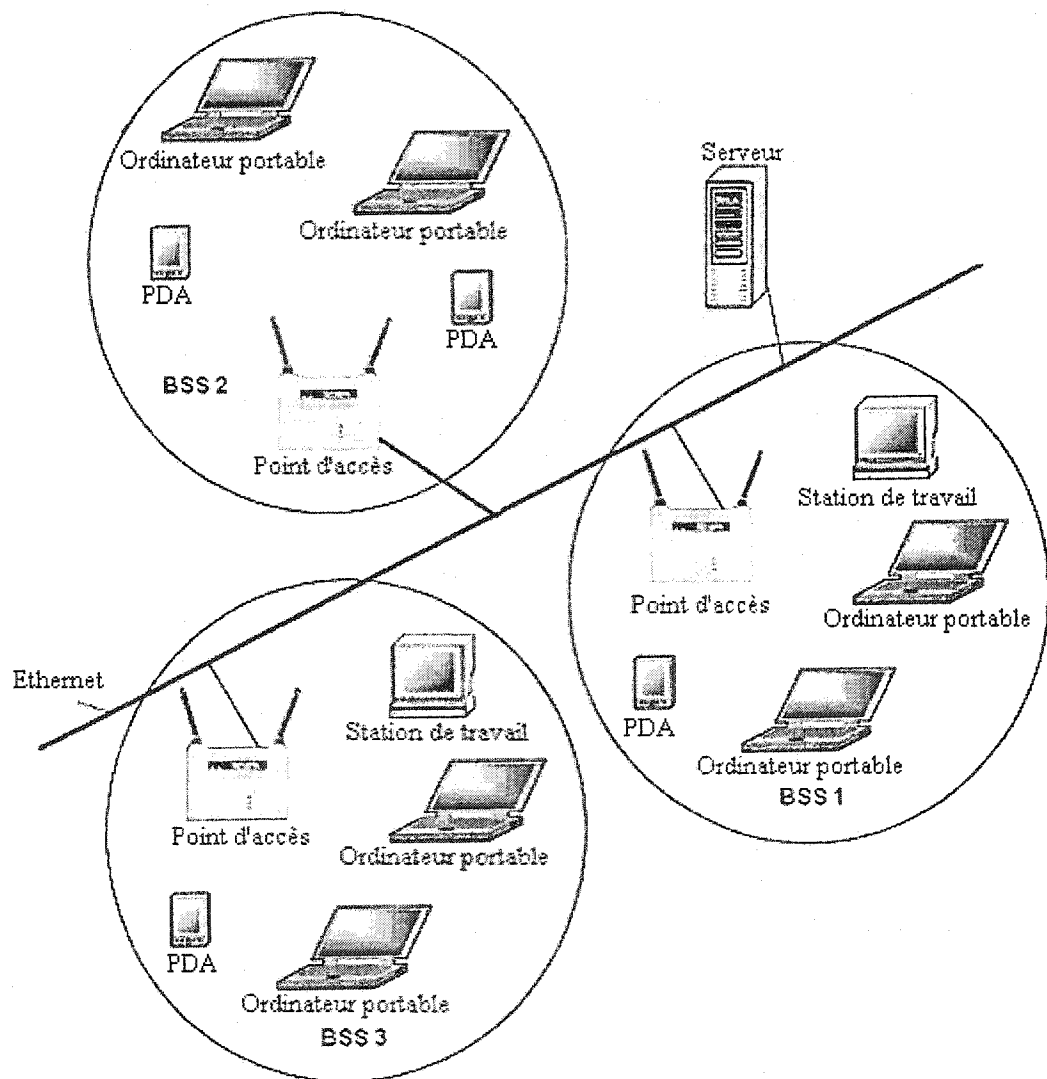


Figure 2.2 Réseau en mode infrastructure BSS

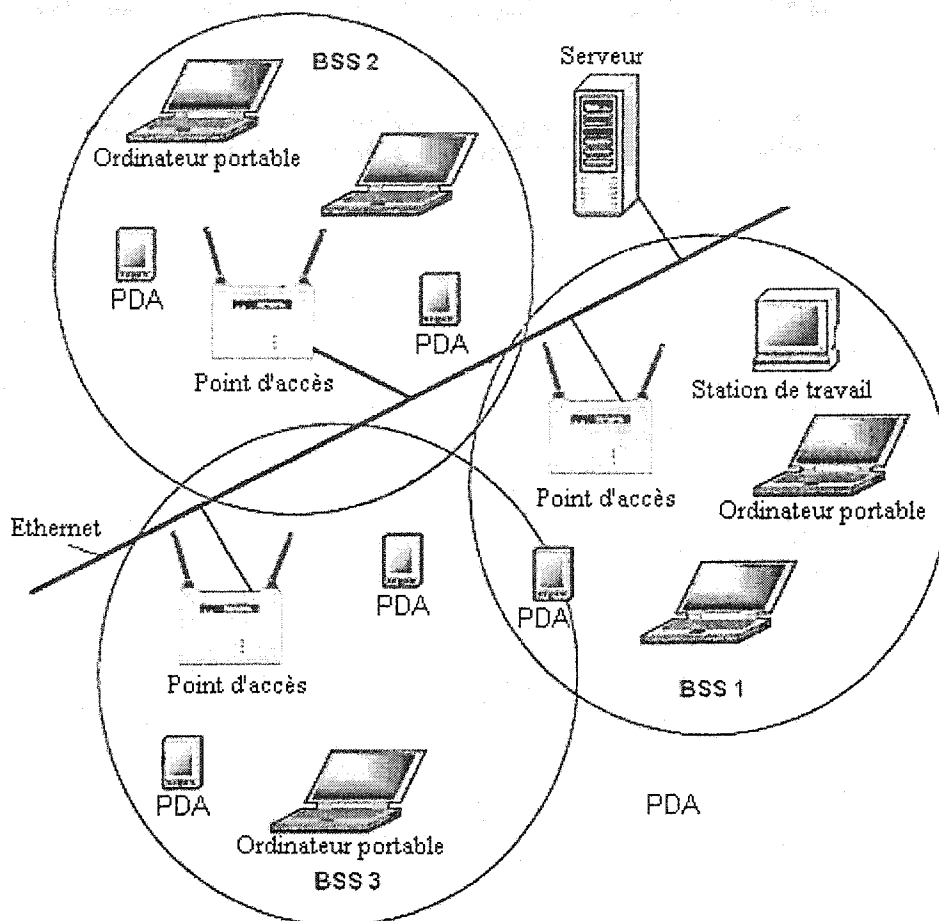


Figure 2.3 Réseau en mode infrastructure ESS

2.6.2 Réseaux en mode ad-hoc

Les réseaux en mode ad-hoc ou IBSS (Indépendant Basic Service Set), sont généralement adoptés aujourd'hui pour des utilisations temporaires et limitées. Ils tirent avantage de leur grande flexibilité, car ne requièrent aucune infrastructure ou gestion centralisée. Les stations sans fil communiquent par paire. Un routage entre deux stations qui sont hors de portée l'une de l'autre est possible via des stations intermédiaires. Ce routage est assez délicat car, contrairement au routage dans un réseau câblé, les nœuds

sont mobiles et donc les notions de voisinages sont fonction du temps. La figure 2.4 montre un réseau ad-hoc.

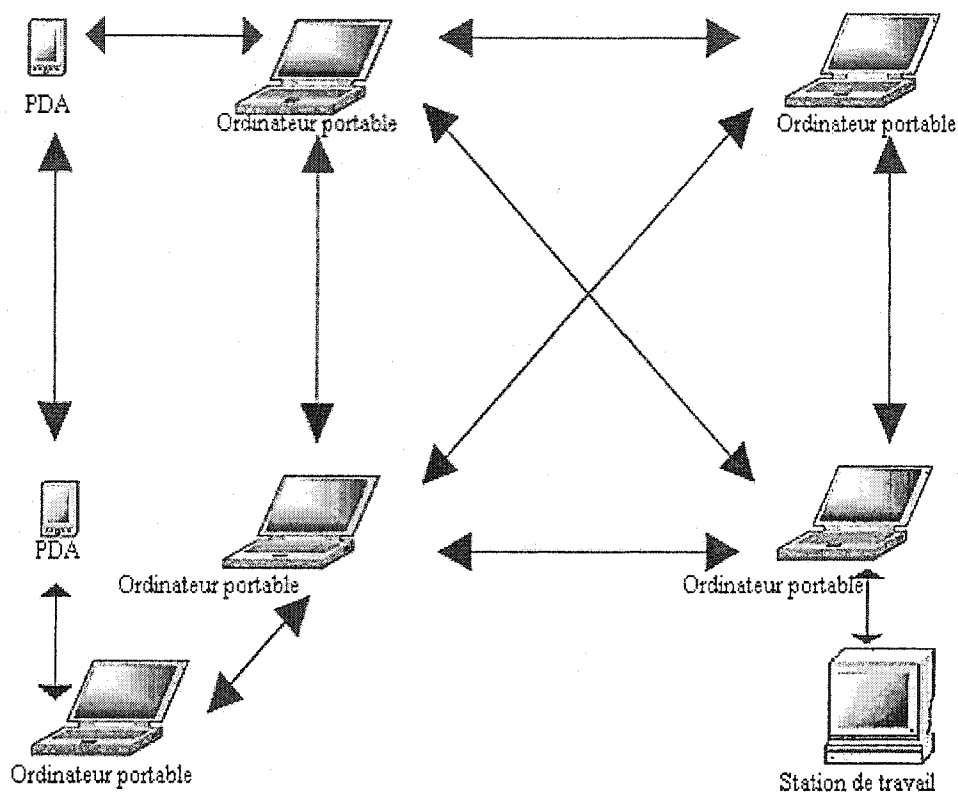


Figure 2.4 Réseau en mode ad-hoc

2.6.3 Réseaux hybrides

Les réseaux hybrides possèdent une architecture nouvelle qui certes est déjà utilisée mais son déploiement reste encore limité. Cette architecture présente une grande connectivité à des coûts abordables. Comme son nom l'indique, elle tire avantage des deux architectures présentées précédemment. Elle exploite aussi bien l'efficacité du routage employé dans les réseaux ad-hoc, à savoir la possibilité de rejoindre des stations hors de portée via d'autres stations intermédiaires, que les avantages prodigués par les

architectures en mode infrastructure, tel que l'accès à d'autres réseaux comme l'Internet. Cependant, cette architecture n'est pas supportée par la majorité des standards populaires. La figure 2.5 illustre un réseau hybride.

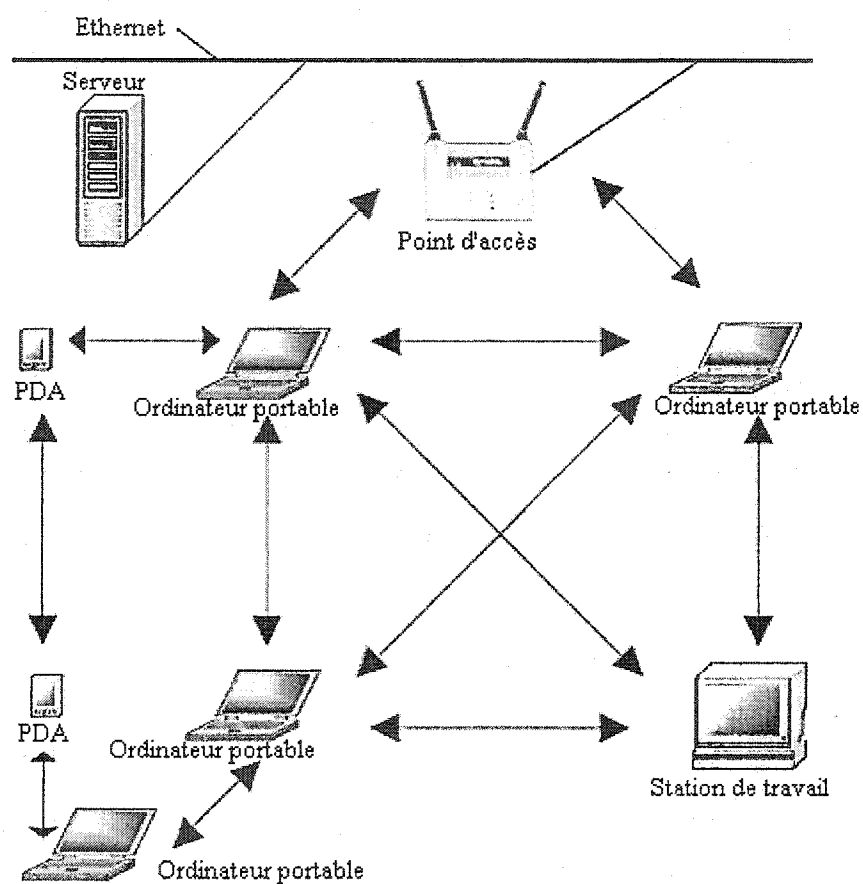


Figure 2.5 Réseau hybride

2.7 Standards existants

Les groupes de standardisation ont pour but de promouvoir et d'harmoniser certains aspects des technologies. Par exemple, les protocoles, la qualité de service, ainsi que les normes font partie de leurs champs d'investigation. Les bénéfices tirés de l'utilisation de standards sont nombreux. On peut citer la compatibilité des équipements, l'efficacité des protocoles, la coordination ainsi que l'accessibilité des coûts des produits. Précédemment dans ce même chapitre, nous avons traité des deux principaux groupes de standardisation. Le premier est l'IEEE, une association nord américaine qui développe des standards dans presque tous les domaines de l'électricité et de l'électronique. Le comité de standardisation IEEE 802 LAN a été créé en 1980. Il traite des protocoles régissant les LANs. Leurs principales réalisations sont les protocoles Ethernet, Token ring et Token bus. Les travaux concernant les WLANs ont été réalisés par des groupes de travail créés à cet effet. On peut citer le groupe IEEE 802.11, mis sur pied en juillet 1990 et qui travaille sur les WLANs et le groupe IEEE 802.15, créé en juillet 1999 et qui traite des WPANs (Wireless Personal Area Networks). En Europe, l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) est un groupe fondé par la commission européenne dans le but de développer des standards pour le marché européen afin d'harmoniser le domaine des télécommunications. Cet institut est formé par près de 800 membres provenant de 52 pays dont quelques-uns ne sont pas européens. Les principales réalisations de l'ETSI sont HyperLAN (1 et 2), HyperAccess et HyperLink. L'IEEE et L'ETSI ont commencé récemment à coordonner leurs efforts dans le domaine des WLANs. Nous allons maintenant détailler les principaux protocoles utilisés dans les standards.

2.7.1 IEEE 802.11

Le groupe IEEE 802.11 créé en 1990, a produit en 1997 un premier standard portant son nom, 802.11. Ce standard décrit les dispositifs de communications des

WLANs opérant dans la bande 2.4 GHz et offrant des débits allant jusqu'à 2 Mbps. Actuellement, ce groupe est divisé en plusieurs groupes de travail. Certains se penchent sur les protocoles de communications et d'autres sur des ajouts pour améliorer la gestion, l'interopérabilité, la sécurité, le contrôle, la qualité de service, et la gestion de la puissance des transmissions dans les WLANs. Le tableau 2.1 résume les protocoles de communications ainsi que quelques-uns de leurs aspects.

Tableau 2.1 Protocoles de communication de 802.11

Protocole	Bande	Débit maximal	Méthode d'accès	Méthode de transmission
802.11a	5 GHz	54 Mbps	CSMA/CA	OFDM
802.11b	2.4 GHz	11 Mbps	CSMA/CA	DSSS
802.11g	2.4 GHz	54 Mbps	CSMA/CA	OFDM ou DSSS

L'annexe est consacré entièrement au standard 802.11. On y présente les différents protocoles et les fonctionnalités des deux premières couches OSI.

2.7.2 HiperLAN

L'HiperLAN (High Performance Radio LAN) est un standard pour les communications à hautes vitesses sans fil, publié par l'ETSI en 1995, opérant dans la bande 5 GHz. Il offre des débits allant jusqu'à 20 Mbps. Les transmissions se font avec une modulation GMSK. Grâce à ses débits supérieurs à ceux du 802.11, il peut supporter des applications multimédias. La nouvelle génération de ce standard est développée sous le nom HiperLAN 2. Elle est appuyée par un groupe industriel qui s'appelle HiperLAN

2 Global Forum impliquant un grand nombre de compagnies comme Bosch, Dell Computer, Ericsson et Nokia. Ce dernier protocole offre des débits allant jusqu'à 54 Mbps basé sur la technologie ATM. La couche liaison de HiperLAN 2, contrairement à tous les autres protocoles existants, est orientée connexion. Elle permet la négociation de la qualité de service comme la largeur de bande et les délais requis.

2.7.3 IEEE 802.15

Le groupe IEEE 802.15 a été créé en 1999 par IEEE. Il a pour mission de développer des standards pour les communications sans fil à courtes distances pour les réseaux WPANs. Il prévoit l'utilisation d'équipements aussi variés que les ordinateurs, les PDAs, les téléphones cellulaires, etc. Le plus populaire de leurs standards est le 802.15.1 plus connu sous le nom de Bluetooth. Ce dernier opère dans la bande 2.4 GHz, offre des débits de presque 1 Mbps mais pour des distances de seulement quelques mètres.

2.8 Étude de la propagation RF à l'intérieur d'un édifice

Le but de ce travail est la planification du déploiement d'un réseau local sans fil. Certes, l'étude de la propagation des signaux est importante mais elle est en vérité très complexe et un grand nombre de paramètres entre en compte. Plusieurs études ont été réalisées à ce sujet (Richalot (1998)), elles sont de plus en plus raffinées et de plus en plus spécialisées dans l'un ou l'autre des paramètres qui interviennent dans la propagation. Ce que nous cherchons est un modèle général mais simple qui caractérise l'atténuation de puissance d'un signal dans le milieu que nous étudions.

Il est important de situer le contexte de notre projet à savoir l'étude de la propagation à l'intérieur d'un bâtiment. Lors de la propagation d'un signal trois mécanismes entre en jeu :

- la réflexion : causée par des obstacles plus grands que la longueur d'onde;
- la dispersion : causée par des obstacles plus petits que la longueur d'onde;
- la diffraction : causée par les bords des objets de l'environnement.

Il existe principalement deux modèles de propagation : le modèle de propagation à grande échelle et le modèle de propagation à petite échelle. Le premier sert à estimer la perte moyenne de puissance en fonction de la distance. Il est principalement affecté par le contour ou la géométrie des obstacles. Le deuxième modèle sert à exprimer la variation du signal, amplitude, fréquence et phase, due à des changements de moins de la moitié de la longueur d'onde. Ces variations sont causées par la mobilité du récepteur et des obstacles ainsi que par les effets de la réflexion. Le principal modèle qui nous intéresse est donc le modèle de propagation à grande échelle car il exprime exactement ce que nous cherchons à savoir l'estimation de l'atténuation moyenne de la puissance en fonction de la distance.

Après avoir déterminé le modèle, il s'agit maintenant de choisir la façon de l'exprimer. En fait, il existe principalement trois façons de faire :

- La façon déterministe : elle se base spécifiquement sur l'expression mathématique des phénomènes physiques (équations de Maxwell). Elle est très générale et d'une grande précision; cependant, elle est très complexe. En effet, pour qu'elle soit bien implantée, il faut étudier la perturbation du signal provoquée par la présence des différents objets caractérisant l'environnement, ce qui peut être très lourd.
- La façon empirique : elle se base sur les mesures prises dans un site. Cette méthode ne demande certes pas des calculs complexes, mais nécessite un grand nombre de données pour raffiner les estimations. De plus, elle est spécifique à l'environnement où les mesures ont été prises, et donc se transpose mal à un autre.
- La façon hybride : comme son nom l'indique, c'est un mélange des deux précédentes. Elle s'articule sur des principes physiques de base puis, elle est

raffinée par des mesures. Généralement, c'est cette méthode qui est choisie pour étudier des environnements intérieurs. Elle se prête donc bien à notre étude.

À la lumière de ce qui a été énoncé, nous avons exploré diverses possibilités pour modéliser l'atténuation due à la distance. Une première avenue étudiée est l'utilisation des équations de Maxwell, mais comme nous l'avons expliqué, elle est très complexe à implanter. Une deuxième avenue est la modélisation assistée par ordinateur où les estimations sont réalisées par la machine. Cependant, nous sommes confrontés aux limitations classiques dans la retranscription de la réalité dans le modèle virtuel. L'avenue sélectionnée est la modélisation réalisée par Hata qui a formulé une fonction paramétrable de l'atténuation en se basant sur les travaux et les mesures effectuées par Okumura et sur l'évanouissement de Rayleigh (voir Bernard Sklar (1997)). Cette formule est la suivante :

$$\overline{L_p}(d) = L_s(d_0)(dB) + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2.1)$$

où $\overline{L_p}(d)$ est l'atténuation moyenne en fonction de la distance, n une valeur comprise entre 2 et 6. on pose $n = 2$ dans l'espace libre et on l'augmente pour caractériser la présence d'obstacles. On détermine la valeur de n par des mesures. $L_s(d_0)$ est l'atténuation dans l'espace libre à une distance référence d_0 , cette valeur est déterminée par l'équation suivante :

$$L_s(d_0)(dB) = 10 \log_{10}\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right)^2 \quad (2.1)$$

Notons que l'équation (2.1) est très générale et elle ne décrit en aucun cas la propagation caractéristique dans un environnement précis. Cette fonction a été donc raffinée pour palier à cette lacune. Comme illustré par voir Bernard Sklar (1997), des

mesures ont démontré que pour une distance d , l'atténuation $L_p(d)$ est une variable aléatoire qui a une distribution log-normale par rapport à $\overline{L_p}(d)$. La fonction d'atténuation devient donc:

$$L_p(d) = L_s(d_0)(dB) + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma(dB) \quad (2.2)$$

où X_σ est une variable aléatoire (en dB) qui suit une fonction Gaussienne de moyenne 0 et de déviation standard σ (en dB). X_σ dépend donc du site et de la distance, elle peut prendre des valeurs aussi grande que 10 dB ou même plus. La valeur de X_σ est en réalité estimée par des mesures. En d'autres mots, la courbe d'atténuation suit une droite en fonction de $\log_{10}(d)$ et les véritables valeurs forment un nuage au tour de cette droite. Pour généraliser cette fonction, qui est applicable dans un étage, nous avons ajouté un terme qui caractérise le principal obstacle physique qui intervient lors de la propagation d'un signal à travers divers étages. Cet obstacle est le plancher. Selon Y.P.Zhang (1994), ce genre d'obstacle engendre une atténuation de 25dB dans la bande 5GHz et une atténuation semblable dans la bande 2.4GHz. Notre modèle final de l'atténuation est donc le suivant :

$$L_p(d) = L_s(d_0)(dB) + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma(dB) + 25p \quad (2.3)$$

où p représente le nombre de planchers séparant l'émetteur du récepteur. Ce modèle servira à établir, selon la distance, si un client peut être associé ou non à un AP donné. De plus, il aidera à estimer le bruit, dans la zone gérée par un AP, provenant des différents APs opérant à la même fréquence, afin de respecter un rapport signal sur bruit minimum. Pour simplifier l'équation, nous allons intégrer les paramètres en fonction de d_0 dans les constantes. La valeur de d_0 n'a pas d'influence sur la valeur finale de la

l'atténuation car d_0 n'est qu'une référence. La fonction d'évaluation de l'atténuation de la puissance aura donc la forme suivante :

$$\alpha_{dB}(d) = A + B * \log_{10}(d) \quad (2.4)$$

L'application de ce modèle sera développée et utilisée dans le chapitre 4 en estimant les paramètres de l'équation (2.4).

2.9 Réglementation

Les réglementations régissant l'utilisation des WLANs diffèrent d'un pays à un autre. Les règlements comportent divers aspects qui doivent être respectés par les manufacturiers pour que leurs produits puissent être homologués et utilisés dans le pays concerné. Généralement, la réglementation concerne les points suivants.

- les bandes de fréquences;
- la limitation de la puissance des transmissions;
- la spécification du type de transmission;
- le nombre de sauts de fréquences;
- la largeur des canaux.

Industrie Canada est l'organe qui réglemente l'utilisation des bandes de fréquences au Canada. Son vis à vis aux États-Unis est le FCC (Federal Communications Commission). Généralement, la réglementation dans les deux pays est harmonisée grâce à des accords négociés par les deux organismes. Dans ce qui suit, nous allons présenter les principaux règlements concernant l'utilisation des WLANs dans le spectre radiofréquence au Canada. Ces informations sont extraites du cahier des charges sur les normes radioélectrique d'industrie Canada (voir CNR-210 (2002)). Deux bandes pour les communications à faible puissance peuvent être utilisées sans licence, c'est-à-dire sans autorisation préalable.

- La bande 2.4 GHz ISM : cette bande a été originellement réservée pour une utilisation dans les domaines de l'industrie, de la science et de la médecine. Les fréquences autorisées varient entre 2.400 et 2.483GHz. Les WLANs, WPANs, et les téléphones sans fil peuvent les utiliser.
- La bande 5 GHz : composée de trois sous bandes : la sous bande inférieure, centrale et supérieure.

Concernant la bande 2.4 GHz ISM, tous les systèmes utilisant la modulation numérique, y compris les systèmes à séquences directes, doivent répondre aux exigences suivantes.

- La largeur de bande minimale à 6 dB doit être supérieure à 500 kHz.
- La densité spectrale de l'émetteur dans l'antenne ne doit pas dépasser 8dBm par bande de 3 kHz.
- La puissance isotrope rayonnée équivalente, qui est la combinaison de la puissance de sortie de l'émetteur avec le gain de l'antenne, ne doit dépasser 1 W. Cependant le gain maximal de l'antenne n'est plus limité depuis la dernière modification apportée en novembre 2002 (CNR-210 (2002)).

Concernant la bande 5 GHz, Les restrictions suivantes sont imposées.

- Pour la sous bande inférieure située entre 5.15 et 5.25 GHz, les communications sont réservées uniquement à un usage interne, c'est-à-dire à l'intérieur des édifices. La puissance isotrope rayonnée équivalente est limitée à 200 mW ou $10+10\log B$, où B est la largeur de bande à 99% du signal.
- Pour la sous bande centrale située entre 5.25 et 5.35GHz, les transmissions peuvent être internes ou servir pour les communications entre les édifices, par exemple dans un campus. La puissance isotrope rayonnée équivalente ne doit pas dépasser 1 W ou $17+10\log B$.
- Pour la sous bande supérieure située entre 5.725 et 5.825 GHz, seuls les communications point à point (directionnelles) sont autorisées incluant les

transmissions sur des longues distances. La puissance isotrope rayonnée équivalente ne doit passer 4 W ou $23+10\log B$.

Nous devons choisir la bande de fréquence adéquate selon le type d'application que nous voulons avoir. Les manufacturiers offrent des produits qui opèrent dans l'une ou l'autre des bandes, cependant, il y a plus de choix de produits qui utilisent la bande ISM.

Chapitre 3

Design et déploiement

3.1 Revue de littérature

Dans cette section, nous exposerons quelques travaux intéressants se rapportant à notre projet.

Une première étude de Massa *et al* (2002) est proposée. Les auteurs avancent une méthode pour assurer la couverture radiofréquence d'une région donnée. Cette couverture est assurée par le maintien d'un certain niveau de puissance. Les auteurs se définissent, en tout point, une puissance minimale nécessaire pour que l'unité mobile puisse être associée à l'AP, et une puissance maximale limitée par la réglementation en vigueur dans l'industrie et par les conséquences des effets de l'interférence avec d'autres technologies. La fonction objectif à minimiser est un compromis entre deux termes pondérés qui s'influencent mutuellement et qu'il faut minimiser. Le premier terme est en fonction de la puissance maximale et le deuxième est en fonction de la puissance minimale. Le paramètre principal de cette fonction est la puissance. En effet, cette dernière est la somme de la puissance générée par l'ancienne topologie et de celle produite par le nouvel AP. Cet AP est caractérisé par sa position en trois dimensions (x , y , z) et par son gain G . Les auteurs proposent un algorithme génétique pour résoudre la problématique. Un chromosome est représenté par quatre gènes : x , y et z , la position dans l'espace de l'AP, et G le gain en puissance de ce dernier. L'algorithme génétique comprend aussi bien le mécanisme de croisement ainsi que celui de la mutation des gènes. Le but poursuivi est de trouver les caractéristiques du nouvel AP à installer. Les résultats obtenus montrent que la fonction objectif à minimiser a une forme en escalier. L'amélioration du coût est très prononcée dans les premières itérations mais devient moins prépondérante après un certain nombre d'itérations. Concernant les gènes, on remarque que c'est celui du gain qui fluctue fortement au début alors que lors de la

stabilisation de la valeur de la fonction objectif, se sont les gènes de la position en trois dimensions qui sont les plus actifs. Cette étude traite donc du problème de la couverture radio-fréquence mais ne tient pas en compte de questions tel que les débits, les interférences, etc.

Une autre étude de Rodrigues *et al* (2000) est proposée. Cet article étudie deux aspects de la planification des WLANs à savoir le meilleur placement des APs et l'affectation des canaux à ces derniers. L'espace étant discrétisé, la zone d'intérêt est découpée en régions. La prochaine étape consiste à identifier les sites candidats. Ce sont ceux qui présentent un faible coût d'installation et qui répondent aux exigences de sécurité ainsi que de disponibilité de l'infrastructure (alimentation électrique, ports de connexion au réseau filaire). L'étape suivante consiste à déterminer la puissance reçue en tout point. Les auteurs proposent deux méthodes : la première est un algorithme de prédiction du niveau du signal reçu de chaque site candidat à chaque point de demande. La deuxième méthode, celle choisie par les auteurs, est de prendre des mesures du niveau du signal reçu en chaque point. En regard du grand nombre de points de demande et de la difficulté de prendre des mesures en tout point, les auteurs ont regroupé ces points en grappes et ont pris une mesure du signal pour chaque grappe. Ces derniers justifient ce choix par le fait que le niveau signal ne diffère pas énormément entre des points de demande très proches. Les auteurs ont constaté que la mesure du signal était assez délicate car elle est très sensible aux obstacles ainsi qu'à l'orientation de l'unité mobile. Ils proposent un algorithme en nombres entiers pour modéliser le problème. Cependant, ils n'ont pas tenu compte de la densité des utilisateurs. Ils justifient cette abstraction par le caractère partagé du médium d'accès dans les WLANs, ainsi que par le fait que le but poursuivi est spécifiquement de réaliser une couverture maximale de la région de demande. Le nombre de APs étant fixé par le budget, le but est de les placer de la meilleure façon afin de réaliser une bonne couverture. La fonction objectif du problème à maximiser est la somme pondérée des puissances reçues en chaque point. Les régions de demande ont des pondérations différentes en vue de l'importance de la zone. Par exemple, les salles de réunion et les bureaux ont des poids supérieurs aux

couloirs et aux halls. Cette fonction est régie par des contraintes de placement des APs et des contraintes d'interférences. Les contraintes de placement regroupent les contraintes de limitations physiques (le nombre maximal d'APs et de sites candidats disponibles) et des contraintes d'affectation. Les contraintes d'interférences régissent le problème d'assignation des canaux; par exemple dans la norme 802.11, deux APs voisins, dont les zones de couverture se chevauchent, doivent avoir des canaux distants de trois canaux selon les mesures effectués et selon les recommandations du manufacturier. Les deux sous-problèmes de placement des APs et d'affectation des canaux sont résolus simultanément par une programmation en nombres entiers. Les auteurs ont utilisé le langage AMPL intégré au CPLEX. Des tests ont été effectués pour un édifice à deux étages. Quatre sites potentiels sont localisés dans le premier étage et deux dans le deuxième. Les résultats obtenus par les auteurs montrent qu'à partir d'un certain nombre d'APs, la zone de couverture totale se stabilise et n'augmente plus beaucoup avec l'ajout de nouveaux APs. Ils constatent aussi que la taille des cellules diminue avec l'augmentation du nombre d'APs, ce qui entraîne une diminution du nombre de clients par AP. Par conséquent, la largeur de bande offerte pour chacun de ces clients est plus importante. Concernant la couverture, après avoir testé toutes les combinaisons possibles, l'algorithme a sélectionné trois APs placés dans le premier étage (290 m^2) qui suffiront à réaliser une couverture de 86% de l'édifice à plus de 10 dB. Les auteurs expliquent ce résultat par le fait que le premier étage est plus vaste et moins encombré d'obstacles que le deuxième (270 m^2). Dans cette étude, aussi bien la couverture que le problème d'interférences ont été pris en compte. Cependant, la qualité de service relative à un débit minimal garanti pour chaque client n'a pas été traitée.

Une troisième étude d'Abolhassani, Salt et Dodds (2002) est présentée. Dans cette étude, les auteurs proposent deux algorithmes pour placer efficacement les radioports ou les points d'accès. La première méthode, qui est une dérivée de l'algorithme de Sebestyen, vise à minimiser la perte de parcourt moyen entre l'AP et les différents points de la région qu'il gère. La deuxième méthode est issue d'un algorithme génétique hybride. Le but de cette dernière est de minimiser la perte de parcourt

maximale entre l'AP et les points de sa région. Les auteurs justifient l'importance du placement des APs par le fait que le nombre de cellules est en augmentation du au besoin croissant de débit. Ils basent leurs métriques sur les pertes car la puissance de transmission des unités mobiles est limitée par la capacité des batteries de ces machines en terme de voltage et de durée. L'algorithme modifié de Sebestyen utilise les pertes au lieu des distances Euclidiennes. Il donne en sortie le nombre d'APs et leur placement. L'espace étant discrétisé, l'algorithme commence par au moins un AP, centre d'une grappe, positionné aléatoirement, puis, chaque nouveau point à considérer est traité comme suit. Le point est affecté au plus proche centre de grappe en terme de perte si cette perte est inférieure à une certaine perte appelée P_{min} . Puis, le centroïde de cette grappe est réévalué à l'aide d'une certaine fonction basée sur les pertes moyennes dans la grappe. Si le point à une perte supérieure à une perte P_{max} vis-à-vis de tous les centres de grappes, il devient le centre d'une nouvelle grappe. Enfin, si aucun des cas précédents n'est vérifié, c'est-à-dire que le point est entre un P_{min} et un P_{max} d'un centre d'une grappe, il est considéré incertain et son traitement est remis à plus tard. Si le nombre de points incertains atteint un certain seuil, tous ces points sont affectés à des grappes suivant la pertes minimale vis-à-vis des centres. Le centre des grappes concernées est mis à jour de la même manière décrite précédemment. Ces affectations se poursuivent tant qu'il y a encore des points à traiter. Cette itération est répétée jusqu'à ce que le nombre maximal d'itérations soit atteint ou s'il n'y a plus de changements significatifs concernant l'affectation des points. C'est-à-dire qu'on régénère aléatoirement le positionnement initial d'un certain nombre de centres et on effectue les affectations décrites. La deuxième méthode considérée se base sur un nombre k prédéterminé d'APs. Elle définit deux fonctions objectifs. Une fonction globale qui prend en compte la pire perte dans la solution et une fonction locale qui est sujet à la perte moyenne dans la solution. Un chromosome qui représente une solution est un vecteur à deux dimensions comportant les coordonnées cartésiennes des k APs. Des processus classiques de création de population et de croisement ainsi que de mutations des gènes sont utilisés. De plus, pour affiner la solution, des perturbations sont

appliquées sur les gènes. On répète les processus jusqu'à ce que le nombre maximal de générations soit atteint ou si on constate des changements infimes dans la valeur de la fonction objectif globale. Des tests ont été effectués pour trois édifices A, B et C dont la complexité est croissante. L'édifice C est plus complexe que les deux autres car il comporte plus de murs et de formes géométriques complexes. Les deux approches proposées ont été comparées à une méthode exacte. Les résultats montrent que l'algorithme hybride donne la solution optimale pour les deux premiers édifices alors que pour le troisième, la différence de coût avec la solution optimale est de 0,9 dB. L'algorithme modifié de Sebestyen engendre une différence moyenne de 4,2 dB pour les deux premiers édifices et 7,4 dB pour le troisième. Le temps de calcul de la méthode exacte est de l'ordre de 10 heures pour les édifices A et B et de 44 heures pour l'édifice C. Les deux algorithmes proposés ont des temps de calcul de l'ordre de quelques minutes pour les trois cas avec une légère augmentation pour l'édifice C. Cette étude offre une approche intéressante du point de vue couverture du réseau mais elle ne prend pas en considération la qualité de service.

Au moment où ce mémoire a été rédigé, nous n'avons trouvé aucune étude qui a traité simultanément de tous les aspects des WLANs ainsi que de la garanti de qualité de service. Dans la prochaine section, nous allons présenter les modèles que nous avons développés pour concevoir un réseau d'ordinateurs sans fil avec garanti de qualité de service.

3.2 Modélisation

3.2.1 Considérations

Avant d'exposer le modèle, nous formulons les hypothèses suivantes : (A1) Le réseau peut être installé dans un édifice à plusieurs étages; (A2) le réseau opère en mode infrastructure c'est-à-dire qu'il comporte au moins un AP. Cet AP peut être connecté au

réseau filaire. De plus, nous prenons pour acquis que les informations suivantes sont données : (I1) la localisation des clients (en trois dimensions), (I2) la localisation des sites potentiels pour installer les APs (en trois dimensions); (I3) l'ensemble des différents niveaux de puissance que les APs peuvent utiliser; (I4) l'ensemble des canaux ne se chevauchant pas et que peuvent utiliser les APs; (I5) le débit minimum requis pour chaque client; (I6) le niveau minimal du rapport signal sur bruit nécessaire pour l'utilisation d'un canal; (I7) l'atténuation entre les clients et les APs ; (I8) la puissance minimale au niveau d'un client nécessaire à une association avec un AP. Le problème consiste donc à trouver un réseau utilisant le minimum d'APs respectant les considérations énoncées plus haut.

3.2.2 Notation

La notation suivante est utilisée tout au long de ce projet. Cette notation inclue des ensembles, des variables de décision, des fonctions et des constantes.

Les ensembles : Soit I l'ensemble des clients, J celui des sites potentiels pour l'installation des APs, P l'ensemble des niveaux de puissance que peuvent utiliser les APs enfin, C , l'ensemble des canaux qui ne se chevauchent pas et qui peuvent être utilisés par les APs.

Les variables de décision : Soit w_j une variable binaire, c'est-à-dire qu'elle peut prendre la valeur 0 ou 1, tel que $w_j = 1$ si et seulement si un AP est installé dans le site $j \in J$; x_{ij} une variable binaire tel que $x_{ij} = 1$ si et seulement si un client $i \in I$ est associé à l'AP installé dans le site $j \in J$; y_j^p une variable binaire tel que $y_j^p = 1$ si et seulement si la puissance $p \in P$ est utilisée par l'AP installé au site $j \in J$. Finalement, soit z_j^c une variable binaire tel que $z_j^c = 1$ si le canal $c \in C$ est utilisé par l'AP installé dans le site $j \in J$.

Les constantes : Soit p_{\min} la puissance minimale nécessaire (en W) reçue d'un AP pour qu'un client puisse communiquer et être associé à cet AP; t_{\min} , le débit minimal requis par chaque client et d_{\min} le niveau minimal du rapport signal sur bruit requis pour pouvoir utiliser le canal.

Les fonctions : soit $\alpha(i, j)$ l'atténuation (en dB) entre le client $i \in I$ et le site $j \in J$ ($0 \leq \alpha(i, j) \leq 1$), $\beta(j, j')$, l'atténuation (en dB) entre le site $j \in J$ et le site $j' \in J$ ($0 \leq \beta(j, j') \leq 1$). Finalement soit $\delta(n)$ le débit par client dans une cellule de n clients ($n > 0$) ($\delta(0)$ prend la valeur de $\delta(1)$).

3.2.3 Le modèle A

Le premier modèle, noté PA, pour résoudre le problème de la planification des WLANs avec garantie de performance, est le suivant :

PA :

$$\min_{w, x, y, z} \sum_{j \in J} w_j \quad (3.1)$$

sujet à

Contraintes d'affectation des clients

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad (i \in I) \quad (3.2)$$

$$x_{ij} \leq w_i \quad (i \in I, j \in J) \quad (3.3)$$

$$\left(p_{\min} - \alpha(i, j) \sum_{p \in P} p y_j^p \right) x_{ij} \leq 0 \quad (i \in I, j \in J) \quad (3.4)$$

$$\left(\alpha(i, j') \sum_{p \in P} p y_{j'}^p - \alpha(i, j) \sum_{p \in P} p y_j^p \right) x_{ij} \leq 0 \quad (i \in I, j < j', j, j' \in J) \quad (3.5)$$

Contrainte d'unicité de la puissance d'émission d'un AP

$$\sum_{p \in P} y_j^p = w_j \quad (j \in J) \quad (3.6)$$

Contrainte d'unicité du canal utilisé par un AP

$$\sum_{c \in C} z_j^c = w_j \quad (j \in J) \quad (3.7)$$

Contrainte de débit minimum

$$t_{\min} - \delta \left(\sum_{i \in I} x_{ij} \right) \leq 0 \quad (j \in J) \quad (3.8)$$

Contrainte de réutilisation des canaux

$$\left(d_{\min} \sum_{\substack{j' \in J \\ j' \neq j}} \left(\beta(j, j') z_{j'}^c \sum_{p \in P} p y_{j'}^p \right) - p_{\min} \right) z_j^c \leq 0 \quad (j \in J, c \in C). \quad (3.9)$$

Contraintes d'intégralité

$$w \in \mathbf{B}^{|J|}, x \in \mathbf{B}^{|I||J|}, y \in \mathbf{B}^{|J||P|}, z \in \mathbf{B}^{|J||C|} \quad (3.10)$$

La fonction objectif (3.1) de PA représente le nombre d'APs installés dans le réseau. La contrainte (3.2) impose que chaque client soit associé à exactement un AP et la contrainte (3.3) requière que si un AP soit installé à un site $j \in J$ alors il y a forcément un client associé à cet AP. La contrainte (3.4) stipule qu'un client $i \in I$ ne peut être associé à un AP installé à un site $j \in J$ que si et seulement si la puissance du signal provenant de cet AP est supérieure ou égale à p_{\min} . Quant à la contrainte (3.5),

elle indique que chaque client est associé à l'AP qui lui fournit le meilleur signal. Les contraintes (3.6) et (3.7) requièrent qu'un AP n'utilise qu'une seule puissance de transmission et qu'un seul canal. La contrainte (3.8) impose que le débit minimum de chaque client soit supérieur ou égal à t_{\min} . Concernant la contrainte (3.9), elle relate la condition de réutilisation d'un canal par un AP. On impose que si au niveau d'un AP, le rapport signal sur bruit d'un canal est inférieur à d_{\min} , cet AP ne peut utiliser le canal en question. Finalement, les contraintes (3.10) sont des contraintes d'intégralité.

Proposition 1. L'inégalité suivante, représentant le nombre minimum d'APs à installer dans le réseau, est valide dans PA

$$\sum_{j \in J} w_j \geq \left\lceil \frac{|I|}{n_{\max}} \right\rceil \quad (3.11)$$

où n_{\max} est le nombre maximum de clients associés à un AP tel que l'inéquation $\delta(n) \geq t_{\min}$ soit respectée. La contrainte (3.11) servira à la relaxation linéaire utilisée pour le calcul de la borne inférieure. Cette borne sera présentée dans la section 4.1.

Comme les contraintes (3.4), (3.5), (3.8) et (3.9) sont non linéaires, PA est un modèle de programmation non linéaire avec variables entières. Cependant les contraintes (3.4) et (3.8) peuvent facilement être linéarisées en ajoutant des variables et des contraintes. Soit x_{ij}^p une variable binaire tel que $x_{ij}^p = 1$ si et seulement si le client $i \in I$ est associé à l'AP installé au site $j \in J$, et utilisant le niveau de puissance $p \in P$. Par conséquent, la contrainte (3.4) peut être remplacée par

$$x_{ij} = \sum_{p \in P} x_{ij}^p \quad (i \in I, j \in J) \quad (3.12)$$

$$x_{ij}^p \leq y_j^p \quad (i \in I, j \in J, p \in P) \quad (3.13)$$

$$p_{\min} x_{ij} - \alpha(i, j) \sum_{p \in P} p x_{ij}^p \leq 0 \quad (i \in I, j \in J) \quad (3.14)$$

La contrainte (3.8) par

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq n_{\max} \quad (3.15)$$

Proposition 2. La contrainte (3.9) est valide dans PA. Pour simplifier le problème, on ramène le niveau du rapport signal sur bruit de toutes les stations d'une cellule donnée à leur AP. Le niveau minimal nécessaire, d_{\min} , doit par conséquent prendre en compte ce dernier aspect. Au niveau de l'AP, la puissance totale reçues provenant des autres APs opérant dans le même canal est la suivante

$$\sum_{\substack{j' \in J \\ j' \neq j}} \left(\beta(j, j') z_{j'}^c \sum_{p \in P} p y_{j'}^p \right)$$

Cette valeur représente pour la cellule la puissance totale du bruit présent. La puissance du signal utile, prise en compte pour calculer le niveau du rapport signal sur bruit devrait être p_{\min} qui représente la puissance minimale pour l'association. La valeur de ce rapport doit être supérieure à d_{\min} . La contrainte (3.9) est donc prouvée.

Proposition 3. PA est NP-difficile.

Soit $P := \{ p_{\min} \}$, $|C| := 1$ et $d_{\min} = t_{\min} := 0$. Dans ce contexte, un algorithme pour PA peut solutionner un problème de couverture minimale par des ensembles (voir Nemhauser and Wolsey (1988), pour plus de détails concernant ce problème) tel que l'ensemble I représente l'ensemble d'éléments et J l'ensemble des sous-ensembles de telle manière que $\alpha(i, j) = 1$ si l'élément $i \in I$ est dans le sous-ensemble $j \in J$ et $\alpha(i, j) = 0$ sinon. La proposition décrite est donc démontrée car le problème de

couverture par des ensembles est un problème NP-difficile (voir Garey and Johnson, (1979)). Étant donné que PA est un problème NP-difficile, nous concentrerons nos efforts sur le développement d'heuristiques efficaces. La formulation du modèle PA sera utilisée afin de trouver une borne inférieure pour mesurer la performance des heuristiques.

3.2.4 Le modèle B

Le modèle A est construit sur la base de la connaissance de la position exacte des clients. Dans le modèle B, noté PB, nous parlerons plutôt de la densité de clients. En effet, dans ce second modèle, la zone de couverture est découpée en carrés. Chacun de ces carrés est caractérisé par un nombre maximal de clients. De cette façon, nous pouvons connaître la distribution des clients dans le bâtiment. Nous considérons que tous les clients d'un même carré sont affectés à un même AP. La figure 3.1 illustre ce que nous venons de commenter.

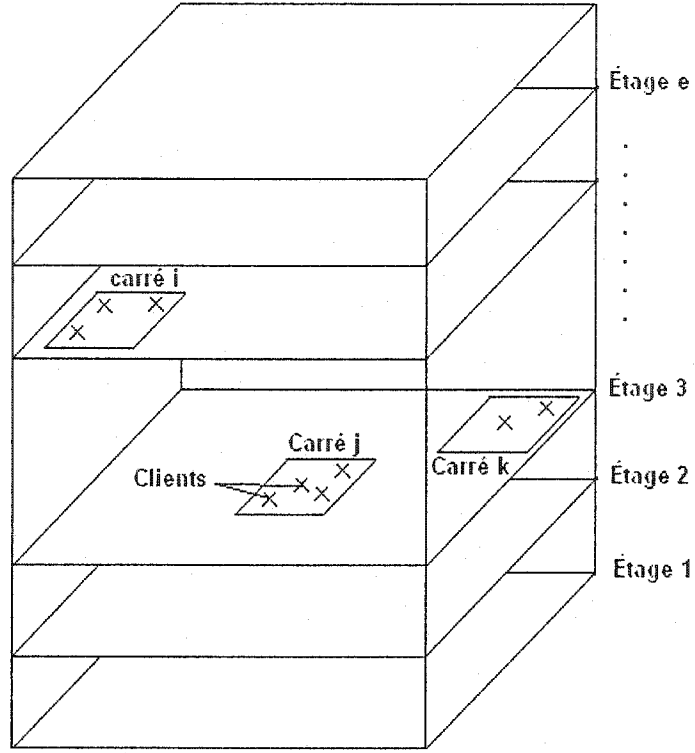


Figure 3.1 Découpage de la zone de couverture en carrés

Soit I l'ensemble des carrés et n_i le nombre maximal de clients dans le carré $i \in I$. Le modèle PB de planification des WLANs est le suivant :

$$\min_{w, x, y, z} \sum_{j \in J} w_j \quad (3.16)$$

sujet aux contraintes (3.2)-(3.7), (3.9) et

$$t_{\min} - \delta \left(\sum_{i \in I} n_i x_{ij} \right) \leq 0 \quad (i \in I, j \in J) \quad (3.17)$$

$$w \in \mathbf{B}^{|J|}, x \in \mathbf{B}^{|I||J|}, y \in \mathbf{B}^{|J||P|}, z \in \mathbf{B}^{|J||C|} \quad (3.18)$$

La fonction objectif (3.16) représente le nombre d'APs utilisés dans le réseau. La contrainte (3.17) stipule que le débit de chaque client doit être supérieure ou égale à t_{\min} . Cette contrainte peut être remplacée par la contrainte linéaire suivante

$$\sum_{i \in I} n_i x_{ij} \leq n_{\max} \quad (i \in I, j \in J) \quad (3.19)$$

où n_{\max} représente le nombre maximal de clients qu'un AP peut gérer en garantissant un débit minimal pour chacun de t_{\min} . Les contraintes (3.19) sont des contraintes d'intégralité.

Proposition 5. L'inéquation valide suivante représente le nombre minimal d'APs à installer dans le réseau.

$$\sum_{j \in J} w_j \geq \left\lceil \frac{\sum_{i \in I} n_i}{n_{\max}} \right\rceil \quad (3.20)$$

Proposition 6. Le problème PB est NP-difficile car il peut être réduit à un problème de recouvrement minimal par des ensembles, la preuve est similaire à celle présentée pour la proposition 3.

Notons que le modèle B peut servir à réaliser une couverture complète de la zone d'intérêt. Pour cela, il faut mettre au moins un client par carré. Si la qualité de service n'est pas indispensable, on peut utiliser une grande valeur pour la capacité de chaque AP.

3.2.5 Recherche avec tabous

Nous allons maintenant proposer une heuristique pour le problème PA basée sur le principe de la recherche avec tabous (voir Glover et Laguna (1997)). Cette résolution est notée TS-PA.

Optimiser la résolution de problèmes combinatoires peut être ardu et complexe. En effet, lorsque la taille des problèmes augmente, les temps de calculs augmentent exponentiellement. Souvent, il est recommandé de trouver de bonnes solutions dans des délais raisonnables plutôt que d'explorer tout le bassin de solution afin de trouver la solution optimale. La recherche avec tabous est une méta-heuristique populaire qui peut être adaptée à plusieurs types de problèmes. Elle part d'une solution initiale et tente de l'améliorer. Elle évite le piège du minimum local en acceptant de temps à autre une solution de moindre qualité dans la perspective que cette dernière pourrait nous conduire à de bonnes solutions. À chaque itération, la recherche génère le voisinage de la solution courante. Chaque voisin est engendré en effectuant un mouvement qui représente en fait un changement d'état de l'un des éléments de la solution courante. Cette dernière est insérée dans une liste de solutions taboues et est exclue du domaine d'exploration pour un certain nombre d'itérations. Les voisins sont évalués par la fonction objectif et le meilleur d'entre eux devient la solution courante. La liste taboue a une taille limitée et a pour objectif d'éviter le risque de se retrouver dans des boucles dont la longueur est inférieure ou égale à la longueur de la liste taboue. Les paramètres de la meilleure solution trouvée ainsi que son coût sont consignés. Plusieurs critères d'arrêt peuvent être utilisés. Par exemple, la recherche est interrompue si on atteint le nombre maximal d'itérations ou si le meilleur coût trouvé n'est pas amélioré après un certain nombre d'itérations.

La notation suivante est utilisée. Soit σ_j l'état du site $j \in J$ tel que $\sigma_j = 0$ s'il n'y a pas d'AP installé dans le site j et $\sigma_j = p$ si un AP utilisant une puissance p est

installé dans le site j . Soit $y(\sigma)$ le vecteur d'état de tous les sites lorsque ces derniers sont fixés.

Pour résoudre $PA(\sigma)$, c'est-à-dire le problème PA lorsque $y(\sigma)$ est fixé, nous allons proposer dans les prochaines sections, une décomposition de ce problème. La fonction objectif peut être réécrite de la façon suivante

$$\sum_{j \in J} w_j + \sum_{j \in J} \theta \left(\sum_{i \in I} n_i x_{ij} - n_{\max} \right)^+ \quad (3.21)$$

où θ est une pénalité choisie par le planificateur. Cette pénalité sert à exprimer le fait que la solution viole les contraintes. En augmentant la valeur de la fonction objectif par cette pénalité, l'algorithme cherchera une autre solution. Nous définissons la fonction $(f(x))^+$ comme suit.

$$(f(x))^+ = \begin{cases} f(x) & \text{si } f(x) \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

car la pénalité ne s'applique que s'il y a dépassement de la capacité de l'AP.

3.2.5.1 Résolution de $PA(\sigma)$

Une fois le vecteur y fixé, la résolution du problème PA peut se ramener à un problème de coloration de graphe. Dans ces conditions, le vecteur w est déterminé par la contrainte (3.6), le vecteur x par les contraintes (3.2) à (3.5) et le vecteur z par une résolution du problème d'affectation de canaux analogue au problème de coloration de graphe, et ce en respectant la contrainte (3.9). Le problème $PA(\sigma)$ est donc un problème NP-difficile qui peut être résout par un algorithme de coloration de graphe. Dans la section 3.3, nous exposons un exemple d'algorithme de coloration de graphe. Nous avons utilisé cet algorithme lors de l'implantation des heuristiques mais ce choix n'est pas unique, en effet, plusieurs autres algorithmes peuvent être utilisés.

La résolution de problème PB ressemble beaucoup à celle de PA. Cependant, elle nécessite quelques adaptations car les paramètres d'un client diffèrent dans les deux modèles. Dans le modèle B, on parle plutôt de "super client", qui représente en fait un carré, et dont les paramètres sont les suivants.

- Position : le centre du carré.
- Poids ou pondération : le nombre de clients dans le carré.

Le calcul de la pénalité dans la fonction objectif (3.21) change car les ressources en terme de débits requis par un "super client" dépendent de sa pondération. Le débit minimum requis par ce dernier est en fait le produit du débit unitaire minimal par le nombre de clients du carré. Après cette adaptation, le processus de résolution du problème PB est le même que celui de PA.

3.2.5.2 Algorithme de la recherche avec tabous

Étant donné $|J|$ sites potentiels et $|P|$ puissances de transmission disponibles, il existe $|P|$ états possibles pour chaque site dont le cas $p = 0$ qui réfère à la non présence d'AP dans le site potentiel. L'espace de solution est l'ensemble des combinaisons possibles des états de sites. Le nombre de ces combinaisons est $|P|^{|J|}$. Le voisinage d'une solution est l'ensemble de combinaisons dont l'état d'un des $|J|$ sites diffère. Le nombre de voisins pour une solution est donc $|J||P| - 1$. On définit un mouvement de la recherche avec tabous, par tout changement dans l'état de l'un des sites de la solution courante. Dans chaque itération, on détermine le meilleur mouvement parmi les $|J||P| - 1$ possibles, tout en respectant les règles de la recherche avec tabous et le critère d'aspiration. Le site choisi est déclaré tabou durant un nombre d'itérations aléatoire suivant une distribution uniforme dans l'intervalle $[L, U]$.

Le critère d'aspiration avance que si un site tabou nous permet de découvrir une meilleure solution plus loin dans la recherche, nous devrions enlever le caractère tabou

de site. Nous allons maintenant détailler la description de la méthode de résolution TS-PA.

Algorithme TS-PA

Étape 1 : (solution initiale)

Trouver une solution initiale avec l'heuristique initiale présentée dans la prochaine section

Répéter les étapes 2 et 3 jusqu'à MaxIter itérations

Étape 2 : (exploration des voisins)

2.1 Déterminer le meilleur mouvement en tenant compte du critère d'aspiration et de la recherche avec tabous. Pour chaque mouvement $\sigma \rightarrow \sigma'$, qui modifie l'état d'un site donné dans la solution courante, on résout $PA(\sigma')$ comme cela est décrit dans la section 3.4.1. Le coût de la solution est donné par la fonction objectif (3.21).

2.2 Déterminer le nombre d'itérations, grâce à une distribution uniforme dans l'intervalle $[L, U]$, pour lequel le site choisi restera tabou.

Étape 3 : (mise à jour de la meilleure solution)

Si le coût de la solution courante est plus petit que le coût de la meilleure solution trouvée, mettre à jour la meilleure solution.

Figure 3.2 Algorithme TS-PA

3.2.6 Heuristique initiale

Nous allons maintenant proposer une heuristique initiale afin de trouver une solution de départ pour TS-PA. Cette heuristique initiale est notée IH-PA.

Algorithme IH-PA

Étape 1 : (initialisation)

Soit $P := \{p_1, p_2, \dots, p_{|P|}\}$

Étape 2 : pour $k := 1$ à $|P|$ faire

2.1 : Mettre $E_i := \emptyset$ et $E_j := \emptyset$

2.2 : Si $|I \setminus E_i| > 0$, aller à l'étape 2.3. Sinon aller à l'étape 2.4.

2.3 : (trouver la localisation des APs)

2.3.1 : Pour tout $j \in J \setminus E_j$ faire

2.3.1.1 : Trouver l'ensemble $\Gamma(j)$ défini comme étant l'ensemble des clients dans $I \setminus E_i$ associés à un AP de puissance p_k installé au site j en utilisant la contrainte (3.4).

2.3.2 : Soit $j^* \in J \setminus E_j$ la valeur de j qui maximise $|\text{Clients}(j)|$.

Mettre $E_j := E_j \cup \{j^*\}$, $E_i := E_i \cup \Gamma(j^*)$ et aller à l'étape 2.4.

2.4 : Pour tout site $j \in J$ faire

2.4.1 : Si $j \in E_j$, mettre $\sigma_j := \bar{p}$. Sinon, mettre $\sigma_j := 0$.

2.5 : Résoudre PA(σ) comme cela est décrit dans la section 3.2.5.1.

2.6 : Calculer le coût de la solution trouvée par la fonction objectif (3.21). Si ce coût est plus petit que celui de la meilleure solution trouvée, mettre à jour la meilleure solution.

Étape 3 : (fin de l'algorithme)

Retourner la meilleure solution trouvée. Fin de l'algorithme

Figure 3.3 Algorithme IH-PA

L'algorithme IH-PA fonctionne comme suit. Pour chacune des puissances de transmission disponible, nous partons avec un ensemble de clients restant et un ensemble d'APs restant qui incluent à cette étape respectivement tous les clients et tous les sites potentiels. On cherche ensuite l'AP qui maximise le nombre de clients que nous pouvons lui affecter parmi ceux qui ne sont pas encore assignés. Puis nous éliminons cet AP ainsi que ces clients de leur ensemble respectif. Cette action est répétée jusqu'à ce que tous les clients soient affectés. À cette étape, nous connaissons les APs utilisés. Nous pouvons alors réaliser le plan d'affectation des canaux et calculer le coût de réseau. Si ce coût est inférieure au meilleur coût déjà trouvé, il devient le meilleur coût trouvé.

Comme nous pouvons le constater, une solution proposée par IH-PA utilise la même puissance de transmission pour tous les APs du réseau.

3.3 Algorithme de coloration de sommets d'un graphe

Pour résoudre le problème de coloration de graphes, qui est un problème NP-complet (Garey et Johnson (1979)), nous pouvons utiliser des méthodes exactes et déterministes. Ces méthodes donnent toujours la solution optimale. Quelques-unes d'entre elles sont illustrées par Daniel Brélaz (1979). Cependant, le temps d'exécution de ces méthodes croît exponentiellement lorsque la taille des graphes augmente. Pour trouver de bonnes solutions dans un temps raisonnable, nous avons opté pour une heuristique appelée algorithme Dsat (voir Brélaz (1979)). Dans Kotz (2002), nous observons une comparaison de l'algorithme Dsat avec la méthode exacte BSC (Backtracking Sequential Coloring), pour des graphes de 60 sommets. Pour de faibles densités d'arc (nombre d'arcs divisé par le nombre de sommets), Dsat présente en moyenne une augmentation de 11% du nombre de couleurs utilisées pour un temps moyen de calcul 167 fois inférieur à la méthode exacte. Pour les graphes dont la densité d'arc est importante, Dsat donne des résultats 8% supérieurs à ceux de la méthode exacte mais présente en moyenne des temps 1600 fois inférieurs à cette dernière.

Avant de présenter l'algorithme Dsatur, nous définissons le degré de saturation d'un sommet comme étant le nombre de couleurs différentes utilisées par ses voisins. Dans un graphe simple G , le degré d'un sommet représente le nombre de ces voisins. Les couleurs sont numérotées de 1 jusqu'à $|G|$. Le nombre maximal de couleurs utilisées est $|G|$, le nombre de sommets dans le graphe. L'algorithme Dsatur est le suivant

Algorithme Dsatur

Étape 1 :Arranger les sommets du graphe par ordre décroissant de leur degré.

Étape 2 :Colorer le sommet de plus grand degré par la couleur 1.

Étape 3 :Choisir le sommet de plus grand degré de saturation parmi les sommets non colorés.

Étape 4 :Colorer ce sommet avec la plus petite valeur de couleur non utilisée par ces voisins.

Étape 5 :Si tous les sommets sont colorés, stop. Sinon, retourner à l'étape 3.

Figure 3.4 Algorithme Dsatur

3.4 Caractérisation de la propagation dans le milieu

À la lumière des informations apportées dans la section 2.8, et grâce à des mesures que nous avons, nous allons caractériser l'atténuation de puissance dans notre environnement en fonction de la distance. Pour simplifier la fonction (2.4), nous allons intégrer les paramètres en fonction de d_0 dans les constantes. La valeur de d_0 n'a pas d'influence sur la valeur finale de la l'atténuation car d_0 n'est qu'une référence. Il faut aussi garder en mémoire que les mesures sont aussi en fonction du standard. Car chaque standard utilise une technique de transmission différente et ce dans la bande de

fréquence qui lui est autorisée. Les données que nous avons utilisées pour l'estimation des paramètres de la fonction d'atténuation sont illustrées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Données utilisées pour l'estimation de l'atténuation

802.11a		802.11b	
Puissance reçue	distance	Puissance reçue	distance
-85 dBm	52 m	-94 dBm	107 m
-80 dBm	40 m	-89 dBm	60 m
-68 dBm	18 m	-85 dBm	40 m

Les données précédentes ont été obtenues avec les paramètres suivants.

- 802.11a : Puissance de transmission 40 mW
Gain de l'antenne de l'AP 5 dBi
- 802.11b : Puissance de transmission 100 mW
Gain de l'antenne de l'AP 2,2 dBi

et finalement un gain de l'antenne intégrée de chacune des deux cartes réseau de 2 dBi.

Selon l'équation (2.2), les points représentant les mesures de l'atténuation forment un nuage au tour d'une certaine droite en fonction de $\log_{10}(d)$. Le but de cette section est de caractériser les paramètres de cette droite. Pour identifier ces paramètres, nous avons fait passer une droite par un maximum de points tout en vérifiant que les autres étaient relativement proches de cette droite. Les résultats obtenus sont les suivants.

Pour le 802.11a opérant dans la bande 5GHz, la fonction d'atténuation est la suivante :

$$\alpha_{dB}(d) = 42.684 + 36.897 \log_{10}(d) + 25p \quad (3.22)$$

Pour le 802.11b opérant dans la bande 2.4GHz, la fonction d'atténuation est la suivante :

$$\alpha_{dB}(d) = 73.45 + 21.06 \log_{10}(d) + 25p \quad (3.23)$$

où p représente le nombre de planchers séparant l'émetteur du récepteur. Ces fonctions serviront à établir, selon la distance, si un client peut être associé à un AP. De plus, nous les utiliserons pour estimer le bruit, provenant des différents APs opérant à la même fréquence, afin de respecter le niveau minimal rapport signal sur bruit.

CHAPITRE 4

Résultats et analyse

4.1 Implantation et interprétation

Les résultats que nous présentons dans ce chapitre concernent le problème PA. L'analyse et l'interprétation que nous en faisons sont similaires à celle du problème PB parce que les algorithmes de résolution sont les mêmes, comme nous l'avons expliqué dans la section 3.2.5.1.

Avant de commencer à résoudre le modèle mathématique proprement dit, nous avons, tout d'abord, conçu une borne inférieure qui reprend les principaux éléments du modèle. Cette dernière minimise la fonction objectif tout en résolvant la problématique de l'assignation des clients. Pour cela, elle manipule le nombre et la localisation des APs tout en gérant la puissance de transmission de chacun d'entre eux. Par contre, la borne inférieure ne tient pas compte du problème de la gestion des interférences et de celui de l'affectation des canaux. Donc, un cas non réalisable dans le contexte de la borne inférieure réfère à une seule situation, celle de l'impossibilité d'affectation d'un ou de plusieurs clients. Cette situation est engendrée par deux possibilités. La première étant le fait qu'un ou plusieurs clients sont hors de portée de tous les APs disponibles. C'est-à-dire qu'aucun signal provenant d'un AP n'arrive au niveau du client avec une puissance suffisante. La deuxième possibilité est la saturation des APs. Cela se produit lorsque tous les APs susceptibles de prendre en charge un client donné ont atteint leur capacité maximale. La résolution de la borne inférieure a été faite par l'utilisation du logiciel CPLEX. Il ne faut pas perdre de vue que, dans la borne inférieure, certaines contraintes ont été relâchées. Donc un cas trouvé réalisable par cette dernière peut ne pas l'être en réalité à cause des contraintes non retenues. La valeur de cette borne sert donc à donner un ordre de grandeur ainsi que de mesurer la qualité de la solution proposée.

Les heuristiques IH-PA et TS-PA ont été implantées en utilisant le langage C. L'heuristique initiale a pour but de trouver une solution réalisable de bonne qualité. Cette solution sera le point de départ de la recherche avec tabous qui essaiera de l'améliorer en effectuant des changements sur les différents paramètres, comme cela a été expliqué dans le chapitre précédent. Les deux heuristiques peuvent détecter une solution non réalisable en analysant le coût de cette solution, qui aura une valeur prohibitive si un client n'aura pas été assigné ou si le nombre de canaux nécessaires aura dépassé un nombre maximale. Cependant, si un ou plusieurs clients avaient été affectés à des APs ayant atteint leur capacité maximale, une pénalité conséquente et proportionnelle au nombre des clients excédentaires affectera le coût de la solution. Dans ce cas, la solution ne sera pas considérée par les deux heuristiques comme étant irréalisable mais son coût reflétera aussi la proportion de la violation de la qualité de service prédéterminée. La solution sera présentée si les heuristiques n'arrivent pas à trouver une meilleure. La capacité d'un AP étant partagée par les clients qu'il gère, si le nombre de ces clients excède un nombre maximal, calculé selon la qualité de service voulu, s'exprimant en terme de débit minimal, le réseau ne pourra plus offrir cette qualité de service. Le planificateur pourra, en remarquant le coût anormalement élevé, décider de permettre une diminution de la qualité de service ou bien de rejeter la solution proposée. Dans ce dernier cas, plusieurs possibilités s'offrent à lui. La première étant de changer le paramètre de capacité des APs et d'essayer de trouver une solution de meilleur coût. Une deuxième possibilité serait de revoir les spécifications tel que le niveau minimal du rapport signal sur bruit. La troisième possibilité serait de chercher de nouveaux sites potentiels. Le planificateur de réseau peut aussi opter pour un autre protocole.

4.2 Plan d'expérience

Nous avons testé et analysé plusieurs aspects de notre approche de la planification des réseaux d'ordinateurs sans fil. Pour ce faire, nous avons élaboré un plan d'expérience. Ce plan consiste à étudier des principaux points suivants.

- 1- **Évaluer la borne inférieure, l'heuristique initiale et la recherche avec tabous.** Nous voulons observer l'évolution du coût du réseau proposé par chacune des trois heuristiques. Pour cela, nous allons faire varier le nombre de clients pour différentes capacités d'APs et fixer les autres paramètres.
- 2- **Observer l'influence du choix de la capacité des APs sur le coût d'un réseau.** Ceci est réalisé par l'optimisation, dans des conditions identiques, du coût du réseau sous différentes capacités.
- 3- **Comparer le coût d'un réseau dans différents édifices.** Nous étudierons plusieurs architectures.
- 4- **Évaluer le coût d'un réseau sous différents protocoles.** Pour ce faire, nous allons garder la même distribution des clients et des sites potentiels en suite nous comparerons le coût, relatif à chacun des protocoles, généré par la résolution du problème.
- 5- **Observer le comportement de la fonction objectif pour différents niveaux de débit minimum.** Pour cela, nous allons faire varier le débit minimum garanti par client et observer l'effet de cette variation sur le coût final du réseau.
- 6- **Apprécier l'effet des différents paramètres de la recherche avec tabous sur le coût de la solution.** Nous pensons qu'aussi bien le nombre maximal d'itérations ainsi que la longueur de la liste tabou peuvent influencer sur la valeur de la solution trouvée.

4.3 Paramètres et données des simulations

Pour réaliser les simulations, nous avons créé un programme qui génère aléatoirement la localisation des sites potentiels ainsi que celle des clients dans un bâtiment. Le nombre de sites et de clients, les dimensions de l'édifice, comme la longueur, la largeur et hauteur ainsi que le nombre d'étages sont paramétrables. Grâce à ce programme nous avons bâti une batterie de fichiers test. Cette méthodologie est illustrée par la figure 4.1. Le nombre de clients dans ces fichiers varie entre 20 et 600. Celui des sites potentiels est entre 20 et 400. Il est important de noter que les fichiers test n'ont pas à priori de points communs entre eux quant à la distribution des clients ou des sites. Concrètement, cela veut dire qu'un fichier de 500 clients et de 200 sites potentiels n'est pas une extension d'un fichier de 400 clients et de 200 sites potentiels auquel on aurait ajouté 100 nouveaux clients aux 400 anciens. La plupart des tests ont été réalisés pour un édifice de 10 étages, de hauteur 40 m, de largeur 50 m et de longueur 100 m. Ce genre d'édifice peut représenter une tour à bureaux. Des fichiers test ont été réalisés aussi pour une bâtisse de 500 m sur 100 m et donc de même superficie que la tour à bureaux. Un aéroport pourrait en être un bon exemple. Les distances et les planchers des étages sont les seuls éléments qui entrent en compte dans le calcul de l'atténuation du signal transmis comme cela a été expliqué dans le chapitre 2. La qualité de service est réalisée en deux points. Le premier est que chaque client est associé à un AP. Le deuxième point est qu'à chacun de ces clients nous spécifions un minimum de 500 kbps. Cette valeur est un paramètre que nous pouvons facilement changer dans le programme. Cependant, le fait de caractériser un débit pour un client donné n'est pas aisé. En effet, si la capacité partagée est de 11 Mbps on ne peut pas dire qu'avec cette capacité on peut garantir à un maximum de 11 clients un débit de 1 Mbps ou à 22 clients un débit de 500 Kbps. Ce n'est pas une simple division. En réalité, plus le nombre de clients augmente plus le nombre de collisions ainsi que celui des différents paquets de gestion augmentent et par suite la capacité utile du médium diminue. Une bonne piste pour solutionner le problème de partage du débit a été inspirée des travaux de Kamerman et Aben (2000)

qui ont fait une étude à pour analyser les différentes composantes du trafic dans les réseaux sans fil.

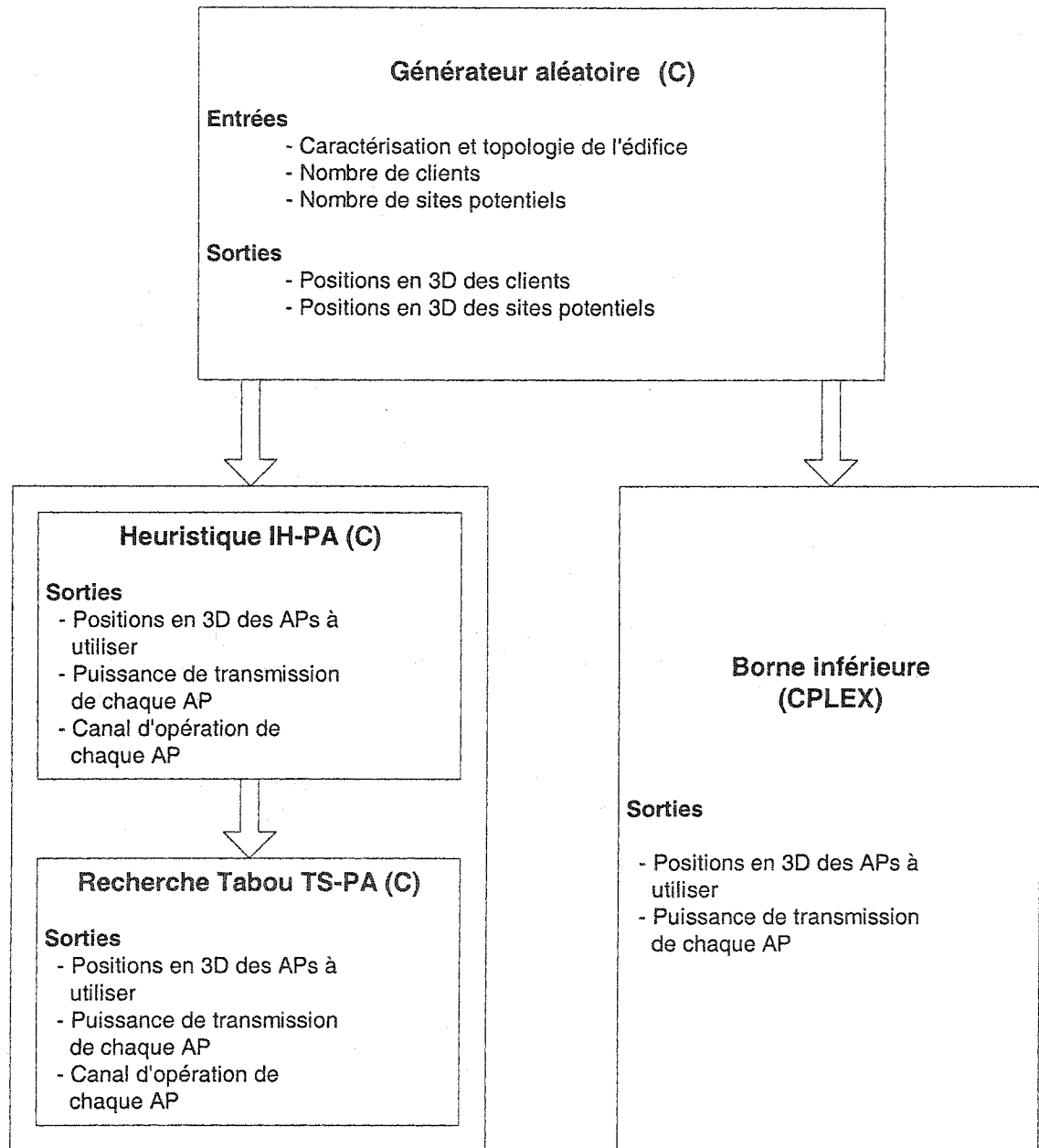


Figure 4.1 Diagramme de blocs de la méthodologie utilisée

Cette étude a servi à caractériser le débit utile partagé. Les figures 4.2 et 4.3 montrent les résultats obtenus pour différentes capacités. Nous excluons du débit utile les différentes pertes causées par les collisions, des échanges RTS/CTS et des entêtes de la couche physique et de la couche liaison ainsi que les temps d'attente. Ce débit utile est certainement affecté par l'augmentation du nombre de clients à cause de l'augmentation des collisions. Cette même étude montre qu'il n'y a pas de grands changements dans le débit utile pour quelques utilisateurs. Les travaux de recherche, d'une plus grande envergure, de Wu *et al* (2002) montrent qu'entre 5 et 80 clients il y a une perte entre 3.6 à 6.7% du débit lorsque les machines utilisent l'échange RTS/CTS. Cette perte devient de plus de 40% si cette option n'est pas utilisée. Donc nous pouvons conclure que le débit utile total reste relativement constant par rapport à l'augmentation du nombre de clients lorsque l'option des échanges RTS/CTS est utilisée.

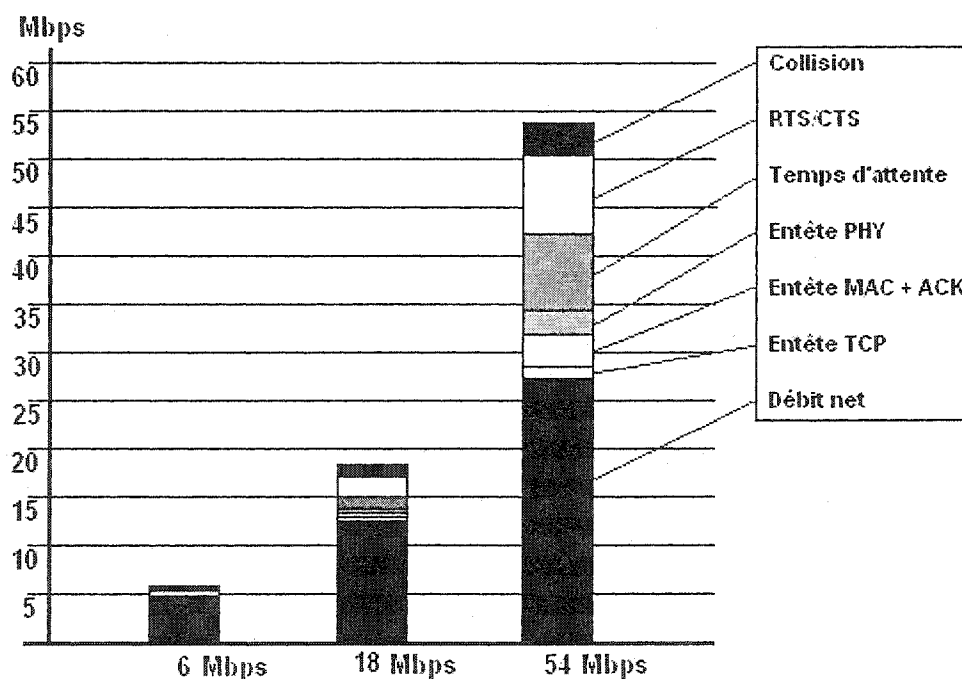


Figure 4.2 Distribution de la capacité dans le IEEE 802.11a

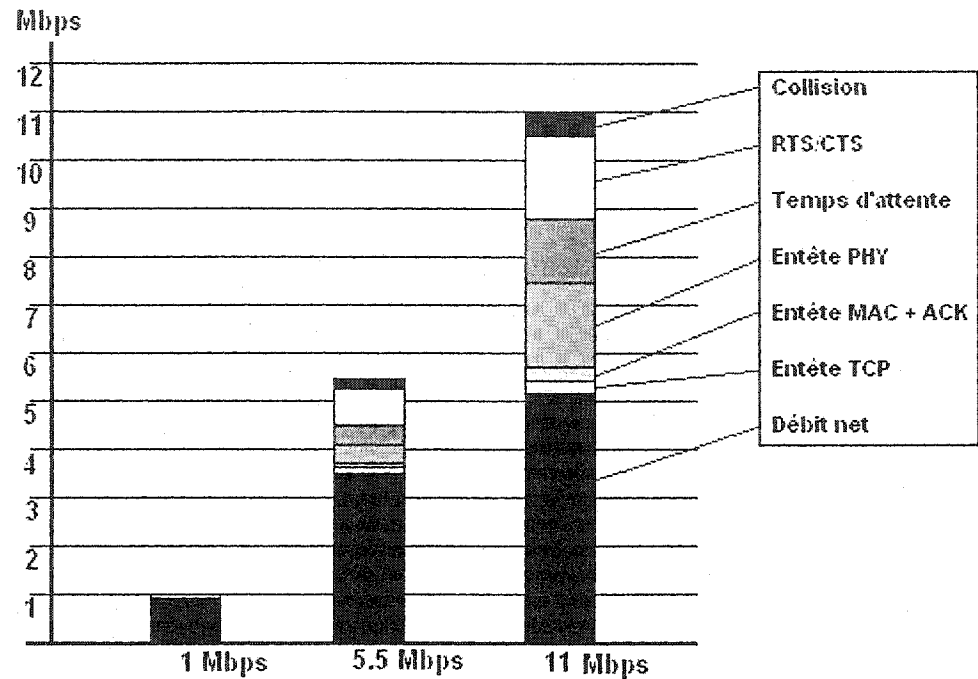


Figure 4.3 Distribution de la capacité dans le IEEE 802.11b

Le tableau 4.1 présente les débits utiles pour différentes capacités. À la lumière de ce qui a été présenté, nous avons pu calculer le nombre maximal de clients qu'un AP peut gérer tout en garantissant un débit minimal de 500 kbps. Le tableau 4.2 expose les résultats obtenus.

Tableau 4.1 Débit utile partagé

802.11a		802.11b	
Capacité	Débit utile partagé	Capacité	Débit utile partagé
6 Mbps	5 Mbps	1 Mbps	0.97 Mbps
18 Mbps	13 Mbps	5.5 Mbps	3.5 Mbps
54 Mbps	29 Mbps	11 Mbps	5.2 Mbps

Tableau 4.2 Nombre de clients pris en charge pour un débit garanti de 500 kbps

802.11a		802.11b	
Capacité	Nombre maximal de clients par AP	Capacité	Nombre maximal de clients par AP
6 Mbps	10	1 Mbps	2
18 Mbps	26	5.5 Mbps	7
54 Mbps	58	11 Mbps	10

Le niveau minimal du rapport signal sur bruit, au niveau des APs, relatif à chacune des capacités utilisées, est illustré dans le tableau 4.3. Nous avons repris ces paramètres des travaux de Ho *et al* (2002).

Tableau 4.3 Rapport signal sur bruit minimal pour différentes capacités

802.11a		802.11b	
Capacité	S/B minimal	Capacité	S/B minimal
6 Mbps	13 dB	1 Mbps	10 dB
18 Mbps	21 dB	5.5 Mbps	17 dB
54 Mbps	30 dB	11 Mbps	22 dB

Les données relatives à la puissance minimale pour permettre à un client de s'associer à un AP, ainsi que la portée maximale de ce dernier ont été extraites de la fiche technique de la CISCO 1200 series (2002). Nous avons aussi vérifié quelques-unes de ces données grâce au matériel dont nous disposons à l'école. Le tableau 4.5 résume ces données.

Tableau 4.4 Puissance minimale pour l'association et portée maximale d'un AP

802.11a			802.11b		
Capacité	Puissance minimale pour l'association	Portée maximale	Capacité	Puissance minimale pour l'association	Portée maximale
6 Mbps	-85 dBm	52 m	1 Mbps	-94 dBm	107 m
18 Mbps	-80 dBm	40 m	5.5 Mbps	-89 dBm	60 m
54 Mbps	-68 dBm	18 m	11 Mbps	-85 dBm	40 m

Nous avons utilisé les données précédentes pour réaliser nos simulations. La valeur de la pénalité de dépassement de la capacité a été fixée à 1000 par client excédentaire. Les résultats et les analyses seront présentés dans la prochaine section.

4.4 Résultats et analyses

Dans cette section, nous allons reprendre un par un les points discutés dans le plan d'expérience et nous apporterons les explications nécessaires quand le besoin se fera sentir.

Tout d'abord, nous n'avons pas trouvé pour la plupart des tests réalisés pour une capacité de 54 Mbps, des solutions réalisables. Ceci s'explique par le fait que la portée d'un AP opérant à cette capacité n'est que de 18m. Pour gérer tous les clients, il faudrait un grand nombre d'APs. Ce nombre important aura pour effet d'augmenter les interférences alors que le rapport signal sur bruit dans cette capacité est assez élevé. Dans ces conditions il est difficile de trouver une solution réalisable. La capacité de 54

Mbps est préconisée pour un usage limité à quelques usagers situés dans un rayon restreint de l'AP. La généralisation de l'utilisation des APs opérant à cette capacité ne devrait pas servir à réaliser la couverture d'un réseau. La plupart des tests ont été réalisés avec le protocole IEEE 802.11a dans un édifice de 10 étages et de superficie totale de 50,000 m². Les figures 4.4 et 4.5 montrent l'évolution de la borne inférieure, de l'heuristique initiale ainsi que de la recherche avec tabous par rapport à l'augmentation du nombre de clients.

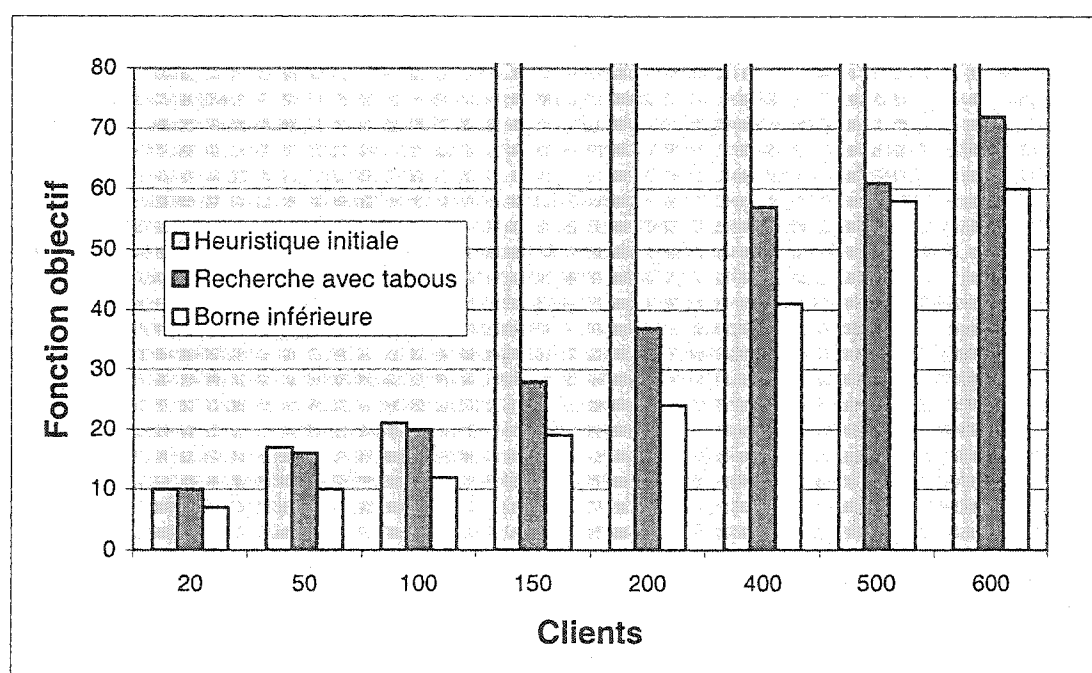


Figure 4.4 Heuristique initiale, recherche avec tabous et borne inférieure pour une capacité de 6 Mbps et 400 sites potentiels

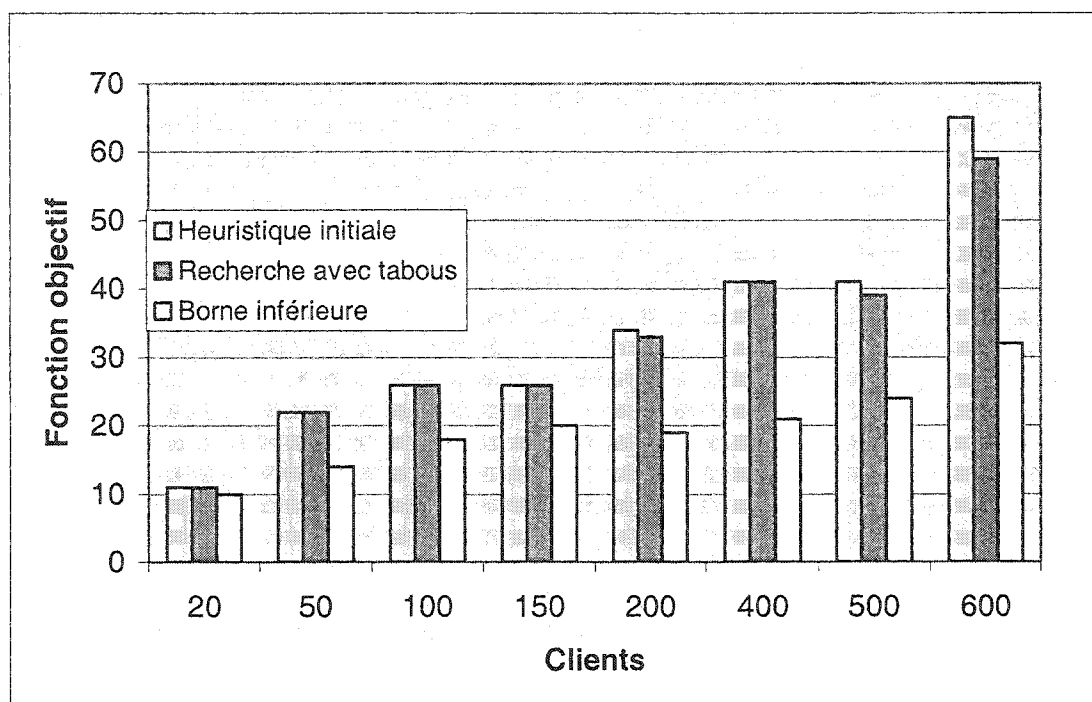


Figure 4.5 Heuristique initiale, recherche avec tabous et borne inférieure pour une capacité de 18 Mbps et 400 sites potentiels

Dans les deux figures, on observe une tendance à l'augmentation du coût du réseau, et ce pour les trois fonctions, vu la nécessité d'augmenter le nombre d'APs lorsque celui des clients augmente. La prochaine observation concerne l'heuristique initiale par rapport à la recherche avec tabous. Il est important de rappeler que l'idée de cette heuristique est de minimiser le nombre d'APs en optimisant le recouvrement des clients par des APs et ce en utilisant des puissances de transmission égales. En d'autres mots, dans une solution de l'heuristique initiale, la puissance utilisée par tous les APs est la même. Dans le cas de la capacité de 18 Mbps, le coût de l'heuristique initiale est très proche de celui trouvé par la recherche avec tabous. En moyenne, la différence est de 2%. Dans le cas de la capacité de 6 Mbps, cette différence est très accrue surtout dans les situations où le nombre de clients est important. Cette différence réside dans le fait que l'heuristique initiale trouve des solutions qui violent les contraintes du débit

minimum garanti. Pour expliquer ces deux phénomènes, nous nous sommes penchés sur les détails des solutions trouvées. Dans le cas de la capacité de 18 Mbps, on remarque que la grande majorité des APs opèrent à la puissance maximale et ce dans presque tous les tests. Cette situation est très proche de celle trouvée par l'heuristique initiale où les APs utilisent la même puissance de transmission qui est en générale la puissance maximale. La couverture et la configuration du réseau trouvées par les deux fonctions sont très proches ce qui explique la proximité des coûts. Dans le cas de la capacité 6 Mbps, concernant les solutions trouvées par la recherche avec tabous, les puissances utilisées par les APs sont très diversifiées ce qui contraste avec les solutions trouvées par l'heuristique initiale. Cependant, la recherche avec tabous converge souvent très vite vers une solution car quelques ajustements dans les puissances de transmission suffisent généralement. Une autre observation importante concerne la borne inférieure versus la recherche avec tabous. Dans les fichiers où le nombre de clients est important, l'augmentation du coût entre les deux fonctions est, dans le cas du 6 Mbps, de 5 à 54% alors qu'elle est de 30 à 95% dans le cas du 18 Mbps. On rappelle que la borne inférieure ne tient pas en compte des interférences entre les APs. Une observation de la puissance totale transmise par canal, illustrée par la figure 4.6, explique ce phénomène. En effet, on constate une différence moyenne de 130% de la puissance totale transmise par canal, entre les deux cas. L'effet de l'interférence est beaucoup plus présent dans le 18 Mbps ce qui explique que la borne inférieure dans ce cas est moins raffinée.

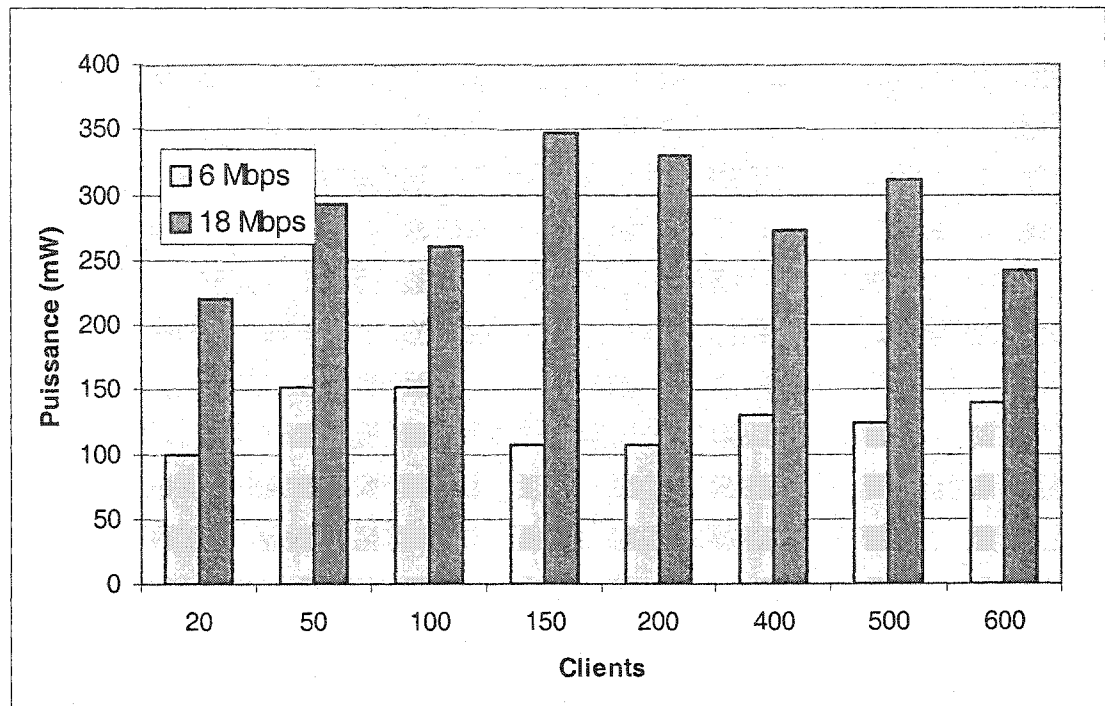


Figure 4.6 TS-PA :puissance totale transmise par canal pour 400 sites potentiels

Concernant les temps d'exécution montrés par les figures 4.7, 4.8 et 4.9, on remarque que l'heuristique initiale est très rapide de l'ordre de quelques dixième de seconde. Ce temps d'exécution est linéairement proportionnel au nombre de clients. Celui de la recherche avec tabous est polynomial comme on peut le constater dans la figure 4.8. Le temps d'exécution de la borne inférieure est exponentiel. Même s'il est inférieur à celui de la recherche avec tabous pour un nombre de clients restreint, il croît plus vite que ce dernier comme on peut le constater dans la figure 4.9.

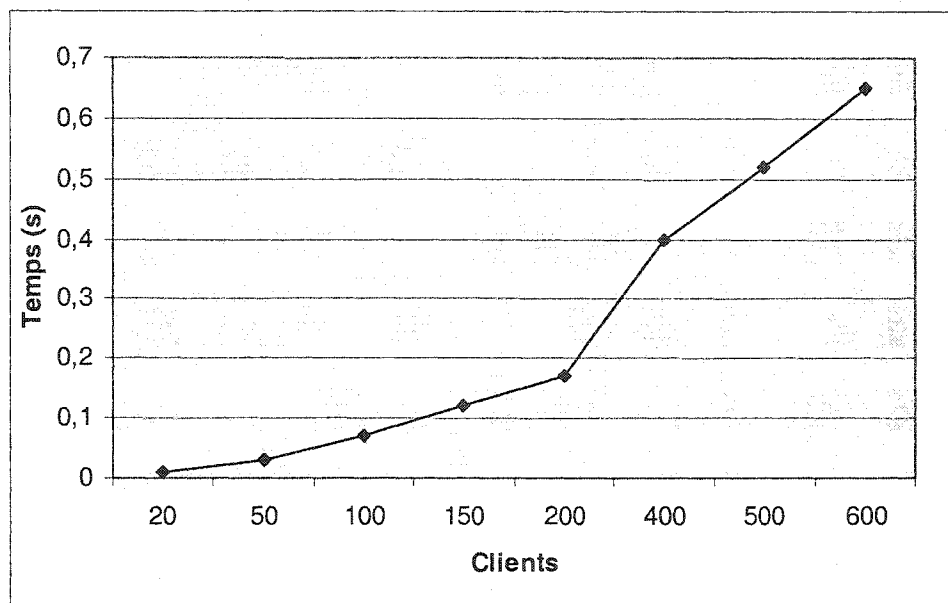


Figure 4.7 Temps de calcul de l'heuristique initiale pour une capacité de 18 Mbps et 400 sites potentiels

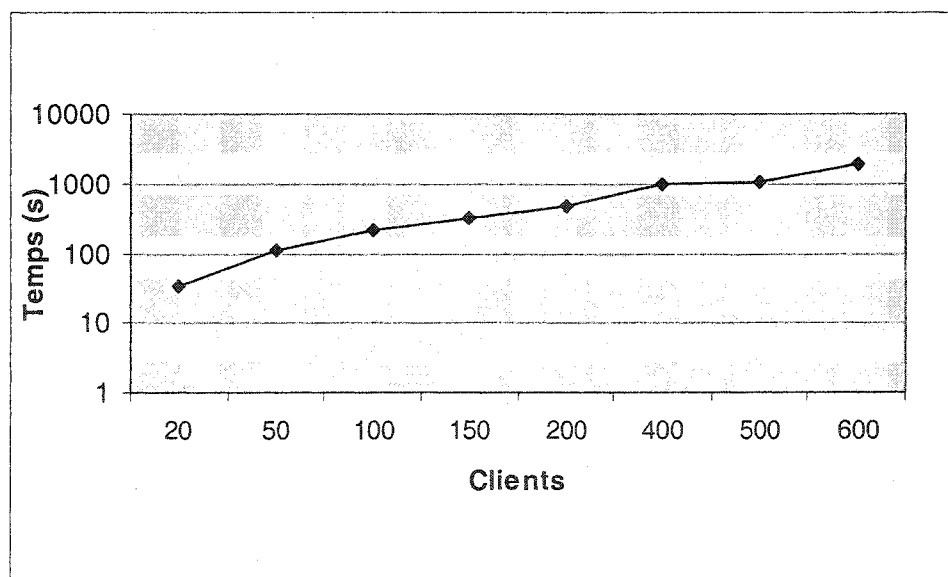


Figure 4.8 Temps de calcul de la recherche avec tabous pour une capacité de 18 Mbps et 400 sites potentiels

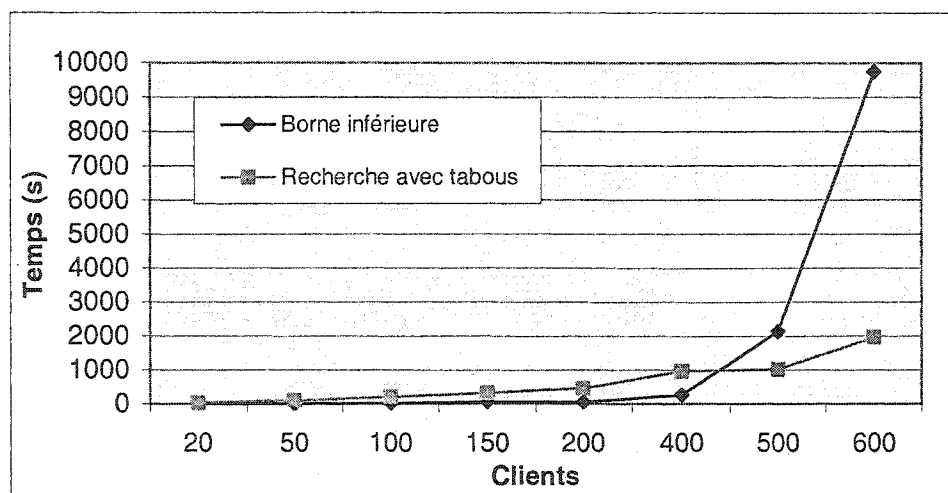


Figure 4.9 Temps de calcul pour une capacité de 18 Mbps et 400 sites potentiels

Nous remarquons qu'il existe une dépendance concernant le coût du réseau relativement au type de capacité choisi, nous pouvons remarquer qu'une différence existe. La figure 4.10 montre l'évolution du coût du réseau en fonction du nombre de clients et ce pour des capacités de 6 et 18 Mbps. Nous constatons que pour des situations où le nombre de clients est relativement petit, le réseau utilisant une capacité de 6 Mbps est légèrement plus avantageux que celui utilisant 18 Mbps. Cependant ce dernier devient plus économique lorsque le nombre de clients devient important. Nous pouvons constater des différences allant jusqu'à 57%. En plus de cela, le réseau opérant à 18 Mbps offre une meilleure utilisation des canaux comme cela est illustré dans la figure 4.11. En contre partie, pour cette capacité, la puissance de transmission moyenne par canal est plus importante, comme on peut le constater dans la figure 4.12, ce qui crée plus d'interférences et peut affecter des réseaux voisins.

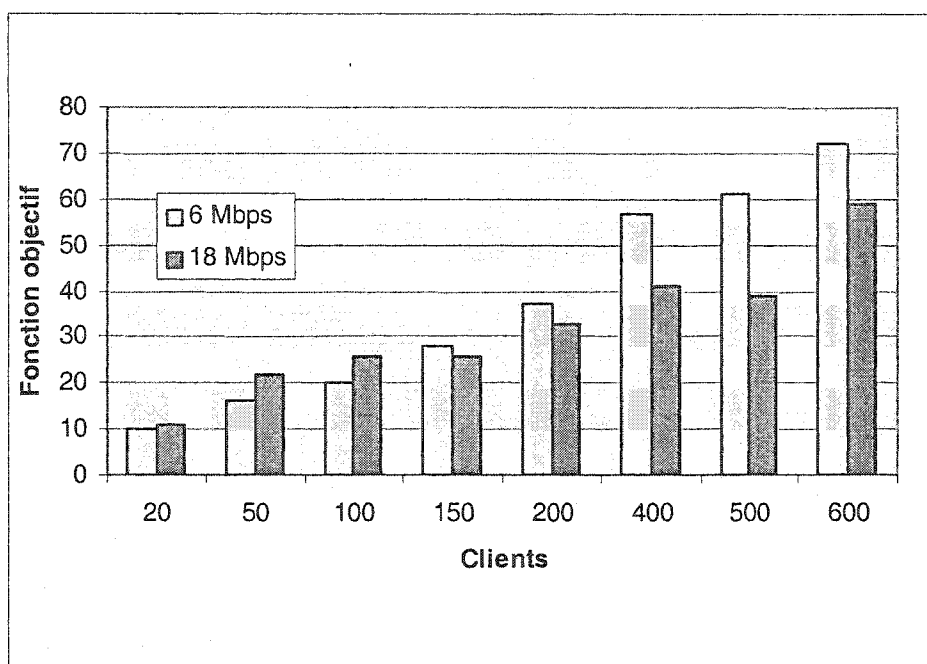


Figure 4.10 TS-PA : coût du réseau pour différentes capacités et 400 sites potentiels

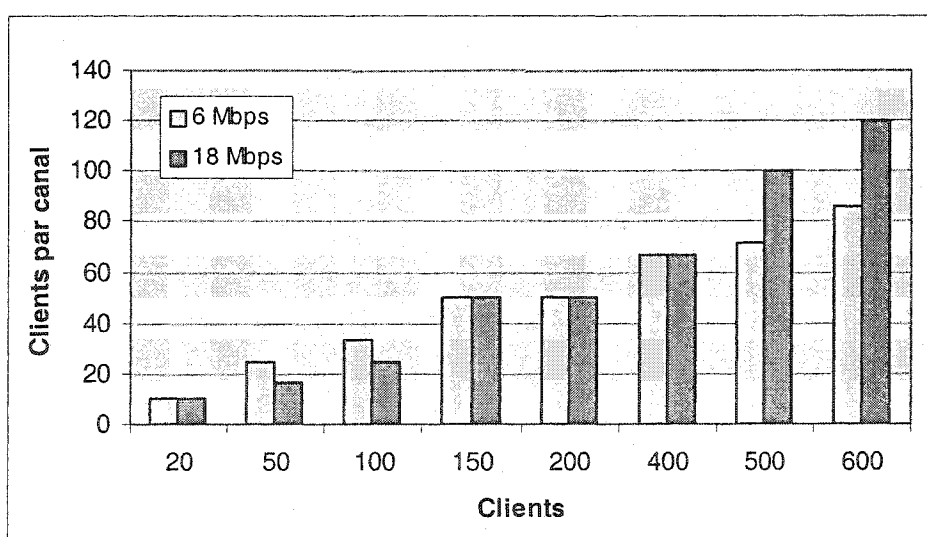


Figure 4.11 TS-PA : utilisation des canaux pour différentes capacités

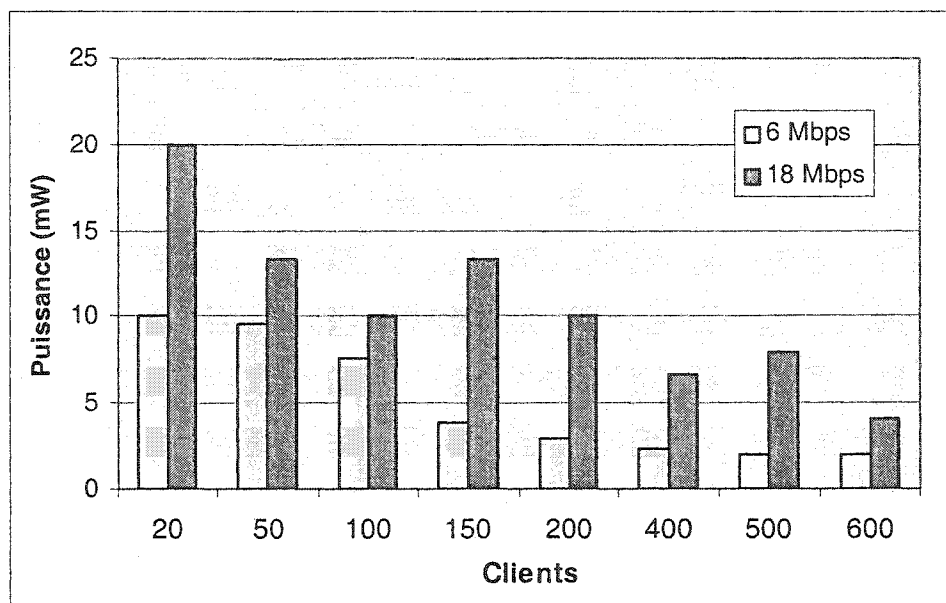


Figure 4.12 TS-PA :puissance de transmission moyenne par AP et par canal

Nous nous sommes aussi intéressés à comparer le coût des réseaux dans des édifices différents. Pour cela, nous avons repris nos résultats précédents compilés pour la tour à bureaux de 10 étages et dont la superficie totale est de 50,000 m², puis nous avons crée des fichiers test pour un aéroport de même superficie comportant un étage unique. La figure 4.13 montre l'évolution du coût des réseaux dans les deux édifices par rapport au nombre de clients. Comme nous pouvons le constater, les coûts varient. Conformément aux prédictions élaborées, nous observerons une nette augmentation du coût du réseau de la tour par rapport à celui de l'aéroport surtout pour un nombre important de clients alors que le coût du réseau de l'aéroport se stabilise. Cette augmentation atteint les 60%. Pour expliquer ce phénomène, on avance l'argument suivant. Dans un espace sans obstacles, le signal se propage mieux et arrive donc au niveau du client avec un niveau de puissance assez élevé pour que le client puisse s'associer. On aura donc besoin de moins d'APs pour couvrir les clients. La stabilisation du nombre d'APs s'explique par le fait qu'à partir d'un certain seuil, une bonne couverture de l'espace est réalisée. À part quelques distributions particulières, ce nombre

d'APs suffit à la demande, sous couvert que les clients associés à un AP donné n'excèdent pas sa capacité.

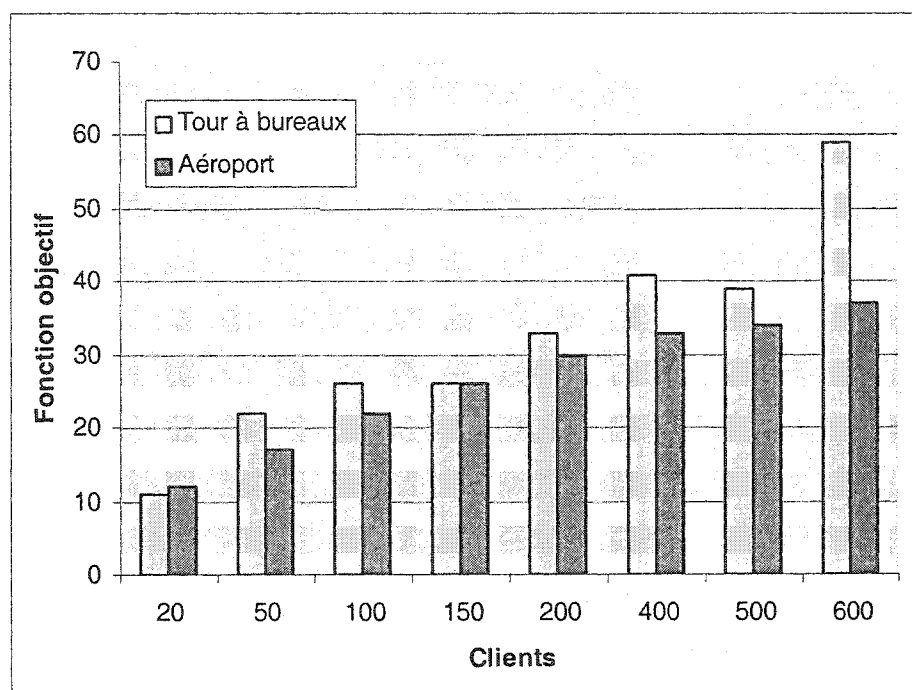


Figure 4.13 TS-PA :coût du réseau pour différents édifices de même superficie pour une capacité de 18 Mbps et 400 sites potentiels

Nous allons maintenant nous intéresser au standard utilisé. Même si les protocoles 802.11a et 802.11b appartiennent à la même famille, plusieurs différences résident. La première différence étant la bande utilisée, 5 Ghz pour le premier et 2.4 Ghz pour le deuxième, ce qui influe sur le comportement du signal. Une deuxième différence est la technique de transmission qui est l'OFDM pour le premier et le DSSS pour le deuxième. Une autre distinction est la sensibilité des machines quant au rapport signal sur bruit minimal et la puissance minimale pour l'association. Enfin le coût des équipements varie beaucoup entre les deux standards. Les APs et les NIC opérant avec le protocole 802.11b sont très populaires et leur coût est plus accessible. Ceux du 802.11a restent encore dispendieux, utilisés en général par des compagnies beaucoup plus que par des particuliers. Les prix des équipements

802.11a sont de l'ordre de vingt fois ceux du 802.11b. Cependant, les coûts que nous utilisons sont ceux du modèle mathématique et non pas en dollars. La figure 4.14 illustre la variation du coût selon le protocole par rapport au nombre de clients.

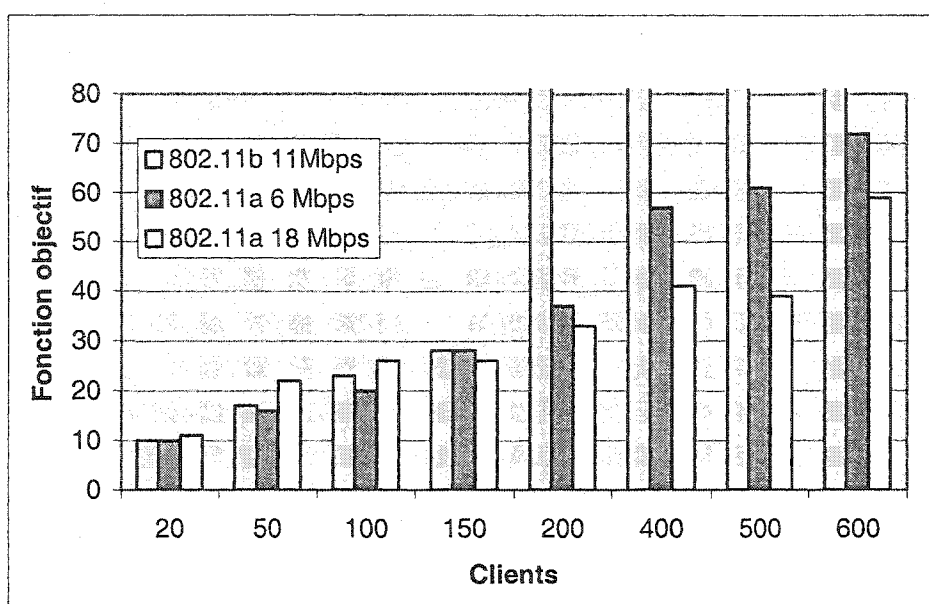


Figure 4.14 TS-PA :coût du réseau avec divers protocoles

Avant d'analyser la figure 4.14, nous notons que le nombre maximal de clients par AP est le même entre le standard 802.11a avec une capacité de 6 Mbps et le standard 802.11b avec une capacité de 11 Mbps. De plus, la portée maximale de ce dernier est la même que celle du standard 802.11a avec une capacité de 18 Mbps, cependant, il est important de noter que la propagation dans le standard 802.11a avec une capacité de 18 Mbps est plus sensible comme nous le montre le tableau 4.4. En observant la figure 4.14, nous constatons que le 802.11b donne toujours des coûts supérieurs au 802.11a avec une capacité de 6 Mbps. Ceci s'explique par le fait que ce dernier offre une plus grande portée, une sensibilité inférieure au bruit et un nombre de canaux plus grand pour un même nombre maximal de clients par AP. Nous notons aussi que pour les réseaux dont

le nombre de clients est relativement restreint (150 clients et moins), les deux protocoles donnent des coûts comparables. Lorsque ce nombre augmente, on ne peut plus trouver une solution dans le 802.11b qui ne viole pas la contrainte de débit minimum. On explique cela par le nombre limité de canaux. L'augmentation du nombre d'APs créera une violation du rapport signal sur bruit minimal, ce qui pénalisera lourdement la fonction objectif.

Nous allons maintenant traiter de l'influence de la qualité de service sur le coût du réseau. La figure 4.15 illustre l'évolution de la fonction objectif pour des débits minimums garantis de 250 kbps, 500 kbps et 1 Mbps. Ce qu'on remarque en premier, est que le coût reste constant pour les trois qualités de service et ce jusqu'à 200 clients. La raison de cette constance est que les différents APs ont une capacité résiduelle suffisante pour garantir le débit minimum le plus élevé. Pour 400 et 500 clients, le coût pour un débit de 1 Mbps augmente brusquement jusqu'à 34% par rapport aux deux autres, alors que celui de 500 kbps reste égal à celui de 250 kbps. Dans ces cas, la capacité résiduelle des APs peut garantir un débit minimum par client de 500 kbps mais pas celui de 1 Mbps. Pour respecter ce dernier, la résolution du problème exige l'ajout de nouveaux APs. Finalement pour le cas de 600 clients, la configuration du réseau trouvée pour 250 kbps ne suffit plus à respecter les deux autres qualités de service. C'est la raison pour laquelle le coût de ces dernières est respectivement supérieur de 44 et de 56% par rapport à la première.

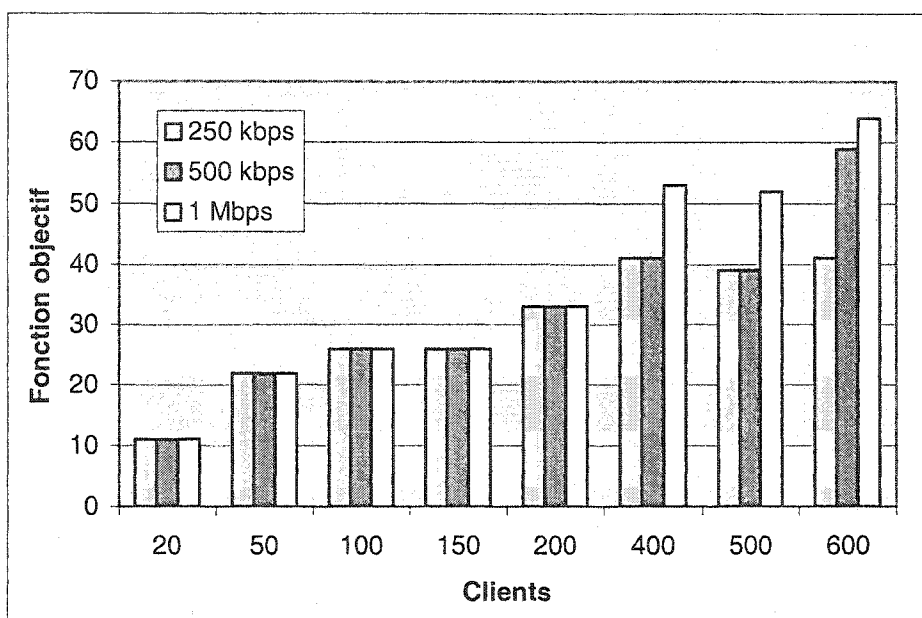


Figure 4.15 TS-PA :coût du réseau pour différents débits garantis avec une capacité de 18 Mbps et 400 sites potentiels

Concernant les paramètres de la recherche avec tabous, nous en avons étudié deux aspects, le nombre d'itérations maximal et la longueur de la liste tabou. La figure 4.16 montre la valeur de la fonction objectif pour différents nombres d'itérations maximal. On remarque tout d'abord que si l'heuristique initiale donne une solution réalisable, la solution optimale trouvée par la recherche avec tabous est généralement repérée avant la dixième itération. Ceci est le cas surtout pour un nombre de clients restreint pour lequel l'heuristique initiale donne des résultats de bonne qualité. Lorsque ce nombre devient plus important, la solution optimale est trouvée avant cinquante itérations. Cette solution n'est plus améliorée même au bout d'une centaine d'itérations. Nous avons aussi réalisé des tests pour une longueur différente de la liste tabou. Pour tous les tests précédents, la taille de cette liste était entre 5 et 10. Les tests pour une longueur entre 0 et 5 ont montré que la recherche avec tabous ne donnait pas toujours les mêmes résultats. En effet, pour cette longueur, les coûts de la fonction objectif avaient augmenté jusqu'à 6.5% par rapport à la longueur de liste initiale.

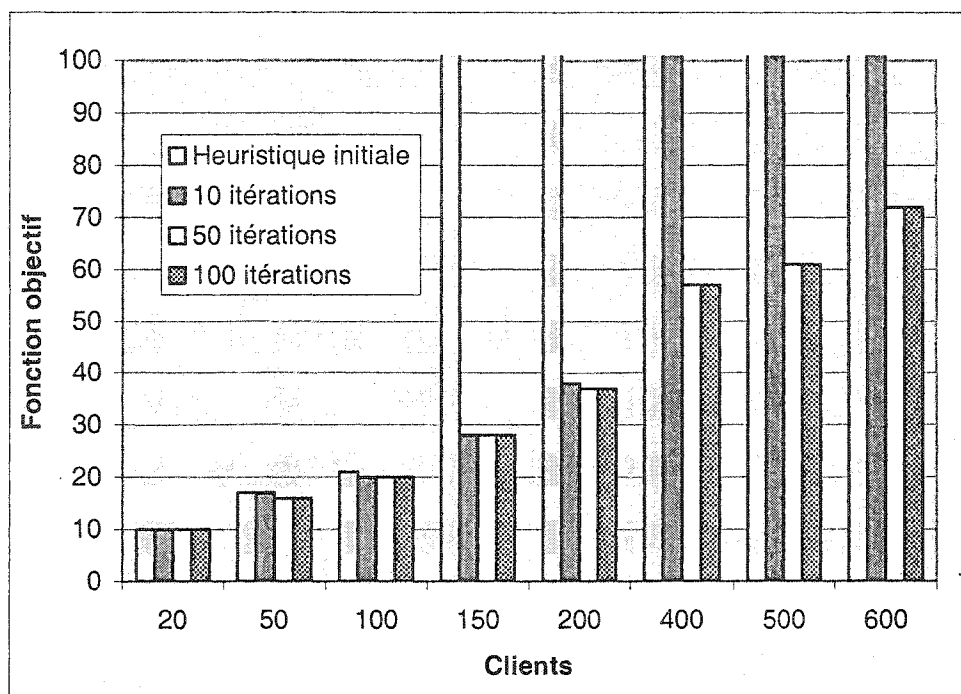


Figure 4.16 Effet du nombre maximal d'itérations

Après avoir réalisé ces simulations, nous remarquons que les résultats obtenus sont conformes aux prédictions faites. En effet, lorsque les interférences sont minimales, la recherche avec tabous et la borne inférieure sont très proches, et dans les situations où ces interférences prennent de l'importance, la borne inférieure s'éloigne de la réalité. Un autre résultat appréhendé est l'augmentation du coût du réseau avec l'augmentation du nombre de clients ou du débit minimal garanti. Nous avons aussi prévu que le standard 802.11b engendrerait des coûts de réseau moins élevés que le 802.11a car ce premier offre des portées plus importantes et une sensibilité moins grande aux bruits. Cependant, lorsque le nombre de clients augmente, le 802.11b n'est plus adéquat et ne garantit plus la qualité de service voulu car ces capacités sont inférieures à celles du 802.11a. Nous avons prédit aussi qu'un espace ouvert comme celui d'un aéroport serait plus facile à couvrir qu'un espace renfermant des obstacles parce que le signal se propage moins bien

s'il rencontre des obstacles et les simulations nous l'ont confirmé. Tous les résultats obtenus attestent de la qualité du modèle que nous avons proposé. Nous pouvons donc conclure que notre technique de planification des réseaux locaux sans fil est adéquate car elle rencontre les objectifs fixés.

CHAPITRE 5

Conclusions

Ce travail de recherche a été motivé par l'expansion de l'utilisation des réseaux locaux sans fil. Les techniques de planification de ce genre de réseau sont encore à leur début et la plupart d'entre elles sont empiriques. La qualité de service reste un point critique qu'il faut améliorer pour garantir le succès de ces réseaux et leur adoption à grande échelle. Dans ce qui suit, nous allons synthétiser les travaux que nous avons effectués, puis, nous exposerons leurs limitations. Enfin, nous donnerons des orientations pour guider les futurs travaux dans le domaine.

5.1 Synthèse des travaux

Dans ce mémoire, nous avons commencé par présenter le contexte de notre recherche. Comme nous l'avons vu, le potentiel des réseaux locaux sans fil est très grand. Ils représentent une solution rentable pour plusieurs situations. Avant d'élaborer notre technique de planification, nous avons exposé nos objectifs. Puis, nous nous sommes intéressés aux détails relatifs à ces réseaux. Nous avons alors exposé leurs composantes, leur fonctionnement, leurs différentes architectures ainsi que quelques-uns des standards disponibles. Nous avons aussi passé en revue les différentes réglementations qui régissent l'utilisation de ces réseaux au Canada. Ensuite, nous avons étudié sommairement la propagation d'un signal radioélectrique à l'intérieur d'un édifice. Pour connaître les pratiques existantes dans la planification des réseaux locaux sans fil, nous nous sommes penchés sur les différents travaux réalisés dans ce domaine. Nous avons alors remarqué que le nombre et la portée de ces travaux n'étaient pas encore suffisamment importants. À notre connaissance et au vu de nos objectifs, nous avons réalisé que la technique nous voulions élaborer était pionnière dans le domaine car elle s'intéressait à des nouveaux aspects relatifs à la qualité de service comme la garantie

d'un débit minimal par client et la gestion des puissances de transmissions. Pour élaborer notre technique, nous avons présenté un modèle mathématique qui englobe toutes les contraintes relatives à la planification des réseaux locaux sans fil et aux objectifs que nous nous sommes fixés. Pour implanter ce modèle, nous avons proposé deux heuristiques. La première est une heuristique qui a pour but de trouver une solution initiale au problème. La deuxième fonction est basée sur le principe de la recherche avec tabous qui part de la solution trouvée par l'heuristique initiale. Le but de cette heuristique est d'améliorer la solution initiale. Pour estimer la qualité de ces deux heuristiques, nous avons créé une borne inférieure basée sur une relaxation de certaines contraintes du modèle mathématique. Cette borne a été implantée grâce au langage d'optimisation CPLEX. Pour analyser la validité et la qualité de notre modèle, nous avons généré des fichiers tests en manipulant les différents paramètres. Pour éprouver notre modèle, nous avons exécuté plusieurs simulations en suivant un plan d'expérience que nous avons élaboré au paravent. Au vu des résultats obtenus, nous avons conclu que le modèle sur lequel notre technique se base est valide et par conséquent, notre technique est appropriée.

5.2 Limitation des travaux

Comme nous l'avons vu, le modèle que nous avons proposé pour planifier les réseaux locaux sans fil est valide. Cependant, il n'est pas optimal. En effet, on peut relever plusieurs limitations. Une de ces limitations est la qualité de la borne inférieure. Celle que nous avons proposée ne tient pas en compte des interférences. Nous avons négligé cet aspect car nous voulions un résultat optimal basé sur une recherche exhaustive dans le bassin des solutions. Ceci aurait causé des temps de calcul très importants. Une autre limitation que nous voulons dévoiler est le calcul du niveau du rapport signal sur bruit présent au niveau de chaque station et que nous avons ramené au point d'accès. La véritable manière aurait été de le faire pour chaque station. Si on se serait pris de la sorte, les contraintes exprimant cet aspect auraient été complexes. En

plus, les matrices utilisées pour calculer les atténuations, le rapport signal sur bruit et les graphes de voisinages auraient été très grandes. Une autre limitation relevée est le fait que nous avons pris en compte pour le calcul du bruit, seulement les signaux transmis par les APs opérant sur le même canal. Il fallait aussi inclure les signaux transmis par les stations sans fil associés à ces APs et calculer individuellement pour chaque cellule, la puissance maximale transmise entre les signaux de toutes les stations incluant l'AP. La raison réside dans le fait que le médium étant partagé, une seule station a le privilège de transmettre à la fois. Nous avons tenté au départ de le faire mais le modèle mathématique était très complexe. Pour des raisons d'allègement et de simplification, nous avons ignoré cet aspect.

5.3 Indications pour les futures recherches

Outre les limitations que nous avons présentées dans la section précédente, les futurs travaux pourraient améliorer notre technique de planification des réseaux locaux sans fil de plusieurs façons. Il serait intéressant d'inclure dans le modèle une recherche de la meilleure capacité à utiliser et ce individuellement pour chaque AP du réseau. Un autre ajout concerne une base de données des caractéristiques de chaque standard disponible. La fonction pourrait tester chacun d'entre eux pour sélectionner celui qui offre le meilleur coût pour le réseau. Une piste très intéressante à considérer est l'examen temporel du comportement du réseau face à la mobilité des utilisateurs basé sur un modèle probabiliste. En générant par exemple des mouvements aléatoires, mais conformes à la réalité, et en se basant sur la méthode de relève entre les APs décrite dans l'annexe, on pourra s'assurer que le réseau pourra continuer à garantir les qualités de service requises.

BIBLIOGRAPHIE

- B. Abolhassani, J. E. Salt et D. E. Dodds, "Optimal radioport placement in cellular networks ", Electrical and Computer Engineering, 2002. IEEE CCECE 2002. Canadian Conference on , 12-15 May 2002, vol. 3, pp. 1321 –1324.
- D. Brélaz, "New Methods to Color the Vertices of a Graph", Communications of ACM, April 1979, no. 4, vol. 22, pp. 251-256.
- Cisco Systems, "Technical Specifications for Cisco Aironet 1200 Series Access Point", Cisco System, Inc., 2002.
- B. Furht et M. Ilyas, "Wireless Internet Handbook: Technologies, Standard, and Applications", Auerbach Publications, 2003.
- M. R. Garey et D. S. Johnson, "Computers and intractability : a guide to the theory of NP-completeness", W. H. Freeman, 1979, pp. 222.
- F. W. Glover et M. Laguna, "Tabu search", Kluwer Academic Publishers, 1997.
- A. Haines, "Outlook of the Wireless Market", Gartner Symposium/Itxpo, 26 Mars 2003.
- M. Ho, M. S. Rawles, M. Vrijkorte et L. Fei, "RF challenges for 2.4 and 5 GHz WLAN deployment and design", Wireless Communications and Networking Conference, 2002. WCNC2002. 2002 IEEE, 17-21 March 2002, vol. 2, pp 783 –788.

IEEE std 802.11, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications", IEEE Inc, 1997.

Industrie Canada, "CNR-210, 5^e édition", Gestion du spectre et Politique des télécommunications, Industrie Canada, 30 novembre 2002.

A. Kamerman et G. Aben, "Net Throughput with IEEE 802.11 Wireless LANs", Wireless Communications and Networking Conference, 2000. WCNC. 2000 IEEE , 23-28 Sept. 2000, vol.2, pp. 747 –752.

J. Khan et A. Khwaja, "Building Secure Wireless Network with 802.11", John Wiley & Sons, 2003.

W. Klotz, "Graph Coloring Algorithms", Mathematik-Bericht, May 2002, pp. 1-9.

A. Massa, M. Donelli, F. Granelli et A. Delai, "Advanced Techniques for optimal planning of Access Points in WLANs", WILMA Workshop Conference, The First Mile Wi-Fi / Powerline, November 8, 2002

F. Ohrtman et K. Roeder, "Wi-Fi Handbook", McGraw-Hill, 2003.

E. Ouellet et al., "Building a Cisco Wireless LAN", Syngress Publishing, 2002.

E. Richalot, M. Bonilla, M. F. Wong, V. Fouad-Hanna, H. Baudrand, et J. Wiart, "Electromagnetic propagation into reinforced-concrete walls", Microwave Symposium Digest, 1998 IEEE MTT-S International, 7-12 June 1998, vol. 3, pp. 1255 –1258.

- R. C. Rodrigues, G. R. Mateus and A. A. F. Loureiro, "On the design capacity planning of a Wireless Local Area Networks", Network Operations and Management Symposium, 2000. NOMS 2000. 2000 IEEE/IFIP , 10-14 April 2000 pp. 335 –348.
- B. Sklar, "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems .I. Characterization", Communications Magazine, IEEE , Issue: 7 , July 1997, vol. 35, pp. 90 –100.
- J. Wheat, R. Hiser, J. Tucker, A. Neely et A. McCullgh, "Designing a Wireless Network", Syngress Publishing, 2001.
- L. A. Wolsey et G. L. Nemhauser, "Integer and combinatorial optimization", Wiley-Interscience publications, 1988.
- H. Wu, Y. Peng, K. Long, S. Cheng et J. Ma, "Performance of reliable transport protocol over IEEE 802.11 wireless LAN: analysis and enhancement", INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, 23-27 June 2002, vol.2, pp. 599 –607.
- Y. P. Zhang et Y. Hwang, "Measurements of the Characteristics of Indoor Penetration Loss", Vehicular Technology Conference, 1994 IEEE 44th , 8-10 June 1994 vol.3, pp. 1741 –1744.

ANNEXE

Le standard IEEE 802.11

A.1 Description du protocole

Le 802.11 est un standard réalisé par l'IEEE pour normaliser les communications entre les différentes machines dans les réseaux locaux sans fil. Il intervient spécifiquement dans les deux premières couches du modèle OSI, c'est-à-dire la couche liaison et la couche physique. Le 802.11 réfère aussi à une famille de protocoles conçus par le même organisme. Certains d'entre eux sont des protocoles de communication et d'autres des ajouts concernant plusieurs aspects comme la sécurité, l'interopérabilité, la gestion de la puissance, etc.

A.2 Fonctionnement

À la lumière des différents concepts et définitions détaillés dans le chapitre 2, nous allons exposer le fonctionnement d'un WLAN utilisant le standard 802.11. Le réseau est composé de plusieurs cellules qui se chevauchent. Chacune de ces cellules est prise en charge par un AP. L'AP ainsi que les stations sans fil qu'il gère communiquent sur le même canal. Il existe plusieurs canaux disponibles, le choix du canal d'opération peut se faire automatiquement ou bien grâce à une configuration manuelle. Le concept de canal sera défini à la section A.4. Il va sans dire que la zone de chevauchement de deux APs opérant sur le même canal est une zone dans laquelle la qualité du signal est détériorée. En effet, le signal d'un AP, reçu au niveau d'une station localisée dans cette zone et gérée par un autre AP, est considéré comme du bruit. C'est la raison pour laquelle il faut minimiser la zone de chevauchement d'APs opérant sur le même canal.

Chaque AP transmet constamment et à intervalles réguliers, typiquement de 100 ms. Les paquets transmis, appelés *Beacons*, servent à signifier la présence du réseau, synchroniser les stations sans fil, permettre à ces dernières de mesurer la qualité du signal et instruire les stations non associées des différents services.

Dans le paragraphe suivant, nous allons décrire le processus d'association.

A.2.1 Association

Pour qu'une station soit incorporée au réseau et puisse communiquer, il faut qu'elle soit associée à un AP. En fait, il existe deux modes d'association : le mode actif et le mode passif. Dans le premier, une station désirant s'associer écoute les *Beacons* et à la lumière des informations transmises, elle peut décider de s'associer ou non à l'AP. Dans le deuxième mode, la station envoie une requête appelée *Probe Packet* successivement sur tous les canaux avec les informations nécessaires. Lorsqu'elle reçoit une réponse d'un AP à sa requête dans le deuxième mode ou bien lorsqu'elle sélectionne un AP adéquat dans le premier mode, la station est à ce moment synchronisée. La prochaine étape est l'association. Le processus de l'association est décrit dans le protocole 802.11 comme suit : le processus est réussi lorsque la station envoie un *Association Request* avec les informations nécessaires et lorsqu'elle reçoit de l'AP un *Association Reply* avec une réponse positive. La station est authentifiée grâce aux informations qu'elle a transmises dans le paquet de requête. Une fois l'authentification réalisée, l'AP enregistre, lorsque cela est possible, l'adresse de la station nouvellement associée. À cette étape, la station sans fil peut transmettre et recevoir des paquets. En effet, pour transmettre un paquet, ce dernier doit absolument passer par l'AP qui gère la station et qui représente l'interface avec le réseau. Au niveau de l'AP, ce paquet est transformé pour poursuivre son acheminement dans le réseau fixe. D'un autre côté, un paquet destiné à une station sans fil est reconnu par l'AP qui la gère. Ce paquet est transformé selon les spécifications du protocole sans fil utilisé puis transmis par l'AP à la station sans fil. Nous pouvons maintenant expliquer ce qui se passe lorsqu'une station

sans fil passe d'une cellule à une autre. Ce phénomène appelé le Roaming, est développé dans le paragraphe suivant.

A.2.2 le Roaming

Le Roaming se manifeste lorsqu'une station sans fil passe d'une cellule à une autre. À la frontière de sa cellule originelle, la station commence à détecter que le signal provenant de son AP commence à se détériorer. Lorsque la puissance de ce signal atteint une valeur plancher, la station commence à chercher un autre AP pour la prendre en charge. Ce processus est appelé réassociation. Pour ce faire, la station commence à balayer les différents canaux pour détecter la présence d'un nouvel AP. Le choix de ce dernier se base sur la plus grande puissance et qualité du signal reçu d'un AP. Une fois le nouvel AP sélectionné, la même procédure d'association décrite dans le paragraphe antérieur est utilisée. La différence réside dans le fait que l'adresse de l'AP originel est incorporée dans les paquets échangés lors de cette procédure. Si le nouvel AP accepte la réassociation de la station sans fil, il informe la station en question ainsi que son ancien AP. Le nouvel AP charge alors la session qui liait la station et son AP originel et cela inclus les paquets en attente. Les deux APs concernés mettent alors à jour les adresses des stations dont ils ont respectivement la charge. Les descriptions et les processus que nous venons de commenter sont communs à tous les protocoles de la famille 802.11. Dans ce qui suit, nous allons détailler les différentes variantes de la famille de ce protocole.

A.3 Variantes du protocole

Les protocoles de la famille 802.11 concernent aussi bien les communications que les autres aspects des réseaux locaux sans fil. Les différentes variantes publiées par l'IEEE, sont présentées dans le tableau A.1.

Tableau A.1 Famille du protocole 802.11

Protocole	Définition
802.11	Protocole de communication pour la bande 2.4 GHz permettant des débits allant jusqu'à 2 Mbps.
802.11a	Protocole de communication pour la bande 5 GHz permettant des débits allant jusqu'à 54 Mbps.
802.11b	Protocole de communication pour la bande 2.4 GHz permettant des débits allant jusqu'à 11 Mbps. Ce protocole est communément appelé Wi-Fi (Wireless Fidelity).
802.11c	Spécifie les informations spécifiques de 802.11 requises au protocole 802.1d.
802.11d	Donne les définitions et les requis pour permettre à des équipements 802.11 d'opérer dans des environnements non conformes à 802.11.
802.11e	Améliore le support pour des applications de réseaux locaux qui requièrent une qualité de service.
802.11f	Protocole de communication utilisé entre les APs.
802.11g	Protocole de communication pour la bande 2.4 GHz améliorant le protocole 802.11b et permettant des débits allant jusqu'à 54 Mbps. Selon l'option choisie, il peut être compatible avec le 802.11b.
802.11h	Enrichie les actuels 802.11MAC et 802.11a PHY avec des extensions concernant l'administration et le contrôle du réseau pour la gestion de la puissance de transmission.
802.11i	Améliore la sécurité dans la sous-couche 802.11 MAC.

Dans les deux prochaines sections, nous allons développer les principales fonctionnalités décrites dans le protocole 802.11 concernant les deux premières couches du modèle de référence OSI (IEEE std 802.11 (1997)).

A.4 Couche physique

La couche physique est la première couche du modèle OSI. Elle assure la connexion physique entre les éléments du réseau en adaptant le format des données des couches supérieures au médium utilisé. Dans le protocole 802.11, plusieurs services peuvent être dispensés par cette couche. Ces services sont prodigués à la couche liaison à travers un point d'accès de service (SAP) appelé PHY-SAP.

A.4.1 Services de la couche physique

Le standard 802.11 spécifie pour la couche physique principalement trois services qui sont en fait des techniques de transmission de données. Ce ne sont pas des techniques de modulation mais plutôt des techniques de distribution du signal sur une certaine largeur de bande. Ces services sont les suivants.

- FHSS PHY : Frequency Hopping Spread Spectrum;
- DSSS PHY : Direct Sequence Spread Spectrum;
- IR PHY : Infrared.

Actuellement, se sont les deux premiers services qui sont les plus utilisés. Nous allons développer leurs concepts dans les prochaines sections. Un autre service est aussi décrit pour certaines variante du protocole, c'est le OFDM PHY. Chacun de ces services s'articule sur trois entités de la couche physique. Les entités en question sont les suivantes.

- La sous-couche PLCP (Physical Layer Convergence Procedure) : adapte les dispositifs des fonctions du PMD (Physical Medium Dependent) au service en

question. Cette sous-couche permet à la couche liaison d'opérer avec un minimum de dépendance avec la sous-couche PMD. En facilitant les procédures à l'interface entre la couche physique et liaison, le service s'en trouve simplifié.

- La sous-couche PMD (Physical Medium Dependent) : les fonctions de cette sous-couche définissent les caractéristiques et la méthodologie de la transmission et la réception des données à travers le médium sans fil entre deux ou plusieurs stations.
- Le PLME (Physical Layer Management Entity) : cette entité assure la gestion des fonctions locales de la couche physique en collaboration avec l'entité de gestion de la couche liaison MLME (MAC Layer Management Entity) à travers un point d'accès de service PLME/MLME-SAP.

La figure A.1 illustre l'interaction entre les différentes entités dans chacun des services offerts.

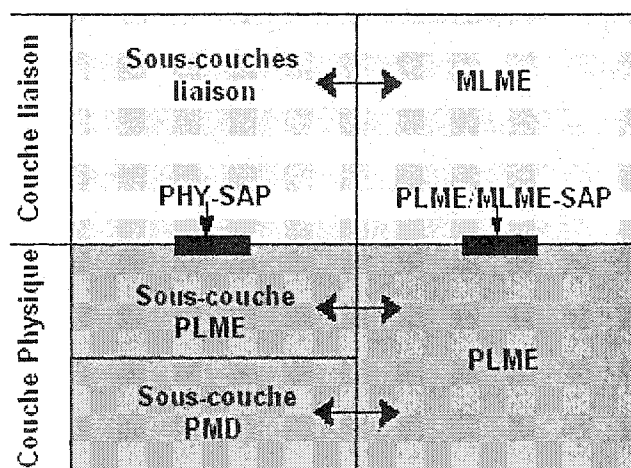


Figure A.1 Interaction entre les entités concernées par le service

Les deux premiers services décrits utilisent des techniques de transmission appartenant à la famille Spread Spectrum. La technologie Spread Spectrum va être définie dans le prochain paragraphe. Le service OFDM PHY sera développé dans la section A.4.2.

A.4.2 Le Spread Spectrum

Le SS (Spread Spectrum) est une technologie de communication développée dans les années cinquante pour des buts militaires afin de minimiser les probabilités d'interceptions et de prévenir les éventuels blocages dans les communications. Le concept fondamental du SS est l'utilisation d'une plus grande largeur de bande que celle requise pour le signal à transmettre. En d'autres termes, diffuser ou étaler le signal sur une plus grande largeur de bande. Vu que le signal est dispersé, en cas d'interception d'une tierce partie, il lui sera très difficile de récupérer le signal à moins d'avoir au préalable les paramètres de la transmission. En général, le signal détecté sera pris pour du bruit. D'un autre côté, si le signal ainsi étalé subit des interférences, les effets de ces dernières lors de la reconstruction du signal seront moins importants que dans le cas d'une transmission sur une bande étroite. En effet le bruit est dilué sur la large bande. Le SS est illustrée dans la figure A.2. Cette technologie de transmission est la seule technologie autorisée dans les bandes 2.4 et 5GHz au Canada et aux États unis. Il existe deux variantes de cette technologie : le DSSS (Direc Sequence Spread Spectrum) et le FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum). Elles seront discutées dans les deux prochaines sections.

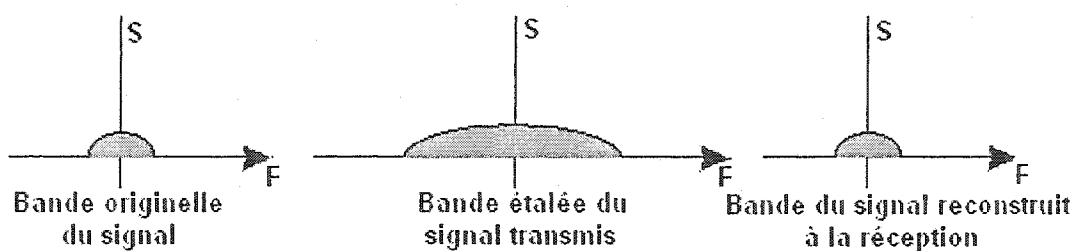


Figure A.2 Illustration du SS

A.4.2.1 DSSS

Le DSSS est une méthode qui transmet les données en les étalant sur une bande de fréquence ou un canal et ce sans changer de fréquence. Le nombre et la largeur des canaux diffèrent d'un pays à l'autre. En Amérique du nord, la largeur du canal est

limitée à 22 Mhz et le nombre des canaux est 11. Ces canaux se chevauchent et sont distribués dans la bande allant de 2.4 à 2.483 GHz. Simultanément, il existe seulement trois canaux qui ne se chevauchent pas se sont les canaux 1, 6 et 11. La figure A.3 illustre le positionnement les canaux dans la bande 2.4 GHz, allouée en Amérique du nord. Lors de la transmission, le DSSS étale l'énergie de l'émission sur toute la largeur de la bande, il n'y a plus de forts pics de puissance. Mais, l'énergie totale reste la même.

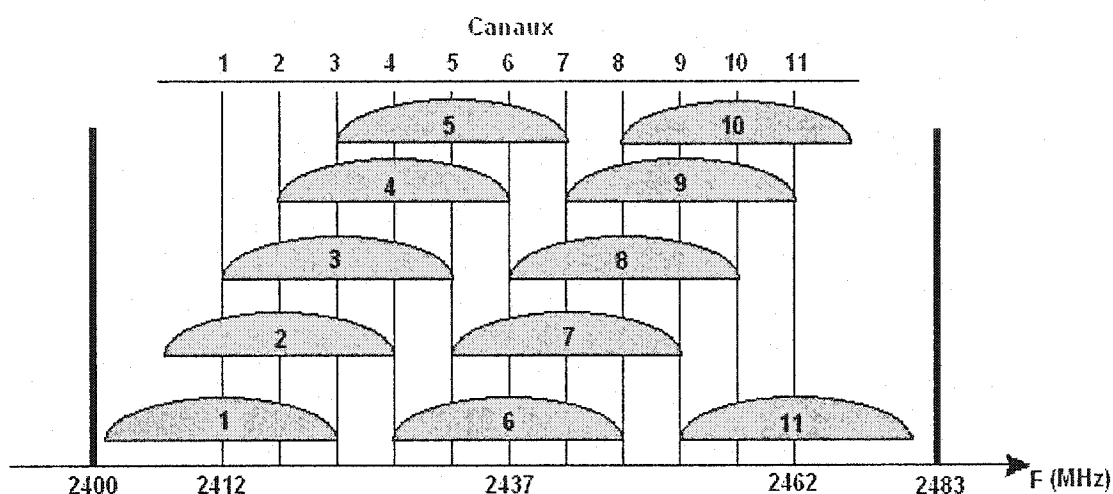


Figure A.3 Positionnement des canaux DSSS

Le DSSS combine les données avec un code numérique. Chaque bit de donnée est transformé par un patron de bits, généré aléatoirement, connu seulement par l'émetteur et le récepteur. Ce patron est appelé code de pseudo-bruit et il est réutilisé pour transformer chaque bite de donnée. Plus un patron est long plus la probabilité est grande de retrouver le signal de donnée ayant subit des perturbations. Cependant cela implique aussi que la largeur de bande à utiliser doit être plus importante. La figure A.4 illustre le fonctionnement du DSSS et la figure A.5 montre l'effet du DSSS sur le signal. Le DSSS est utilisé dans le 802.11b et le 802.11g en option.

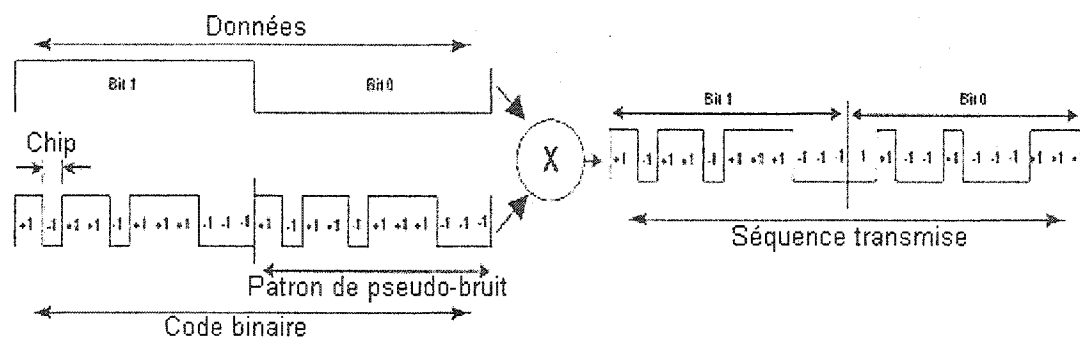


Figure A.4 Fonctionnement du DSSS

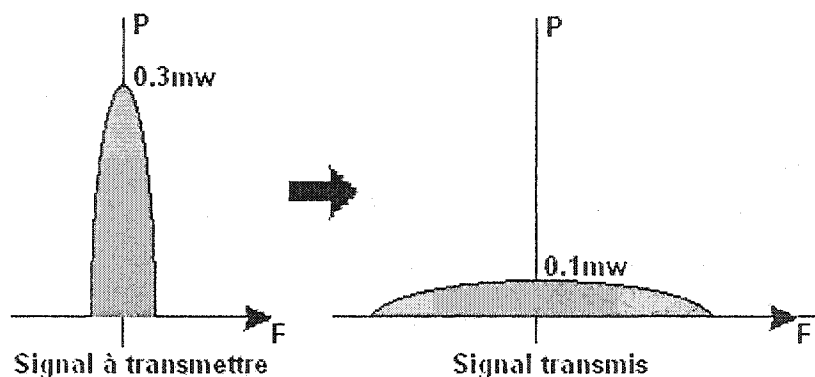


Figure A.5 Effet du DSSS sur le signal

A.4.2.1 FHSS

Dans le FHSS le signal est modulé avec une porteuse puis envoyé sur l'un des canaux disponibles. Comme son nom l'indique, cette technique se base sur les sauts de fréquences, c'est à dire que le signal est envoyé successivement sur différents canaux. Le choix des canaux peut sembler aléatoire mais le patron des fréquences est connu par l'émetteur et le récepteur. La synchronisation entre ces deux derniers est cruciale. Le FHSS est très réglementé quant à la durée de l'utilisation d'un canal par intervalle de temps, le nombre minimal de canaux ainsi que leur largeur. En Amérique du nord, la largeur d'un canal est de 1 MHz et leur nombre est de 75 dans la bande 2.4 GHz. Le bénéfice tiré de cette technique est que dans le cas de l'existence d'un bruit, ce dernier ne dégradera que la partie des canaux qui partagent son spectre, le reste des canaux

restera épargné et donc juste une partie du signal sera affectée. D'autre part, l'effet de l'interférence avec d'autres formes de communication à bande étroite sera minimisé parce que la largeur de bande de chaque canal du FHSS est relativement petite. Cependant cette méthode n'est pas aussi populaire que le DSSS, elle a été utilisée dans l'une des versions du protocole 802.11 classique. La figure A.6 illustre une transmission utilisant la technique FHSS.

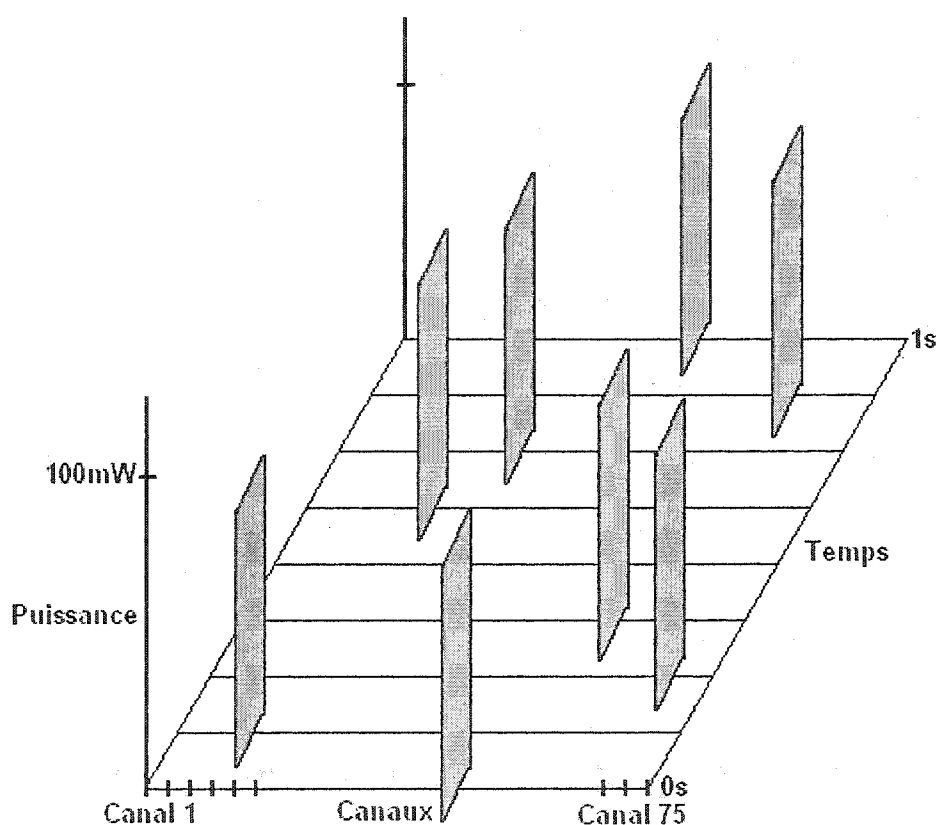


Figure A.6 Transmission utilisant FHSS

A.4.2 L'OFDM

L'OFDM (Orthogonal frequency Division Multiplexing) est une technique de gestion des fréquences basée sur un processus mathématique appelée transformée rapide

de Fourier ou FFT (Fast Fourier Transform). Cette méthode permet à des circuits ou sous-porteuses de se chevaucher tout en gardant l'intégrité des signaux grâce à leur orthogonalité. Cette méthode est très efficace en regard de l'utilisation du spectre et permet des débits élevés. Le protocole 802.11a utilise OFDM. Il divise la fréquence porteuse en 52 sous-porteuses de plus petites vitesses qui sont par la suite modulées. Quarante huit d'entre elles sont utilisées pour la transmission des données alors que les quatre restantes sont des sous-porteuses pilote qui servent à aligner les fréquences à la réception. Le protocole 802.11g peut utiliser par défaut la technique OFDM. En Amérique du nord, la sous-bande centrale de la bande 5 GHz est composée de 8 canaux séparés de 20 MHz sur un total de 200 MHz de bande disponible. Les signaux transmis dans un canal donné ne devraient pas chevaucher les autres signaux des canaux voisins. La figure A.7 montre la répartition de ces huit canaux dans le spectre de fréquence de la sous-bande centrale de la bande 5 GHz.

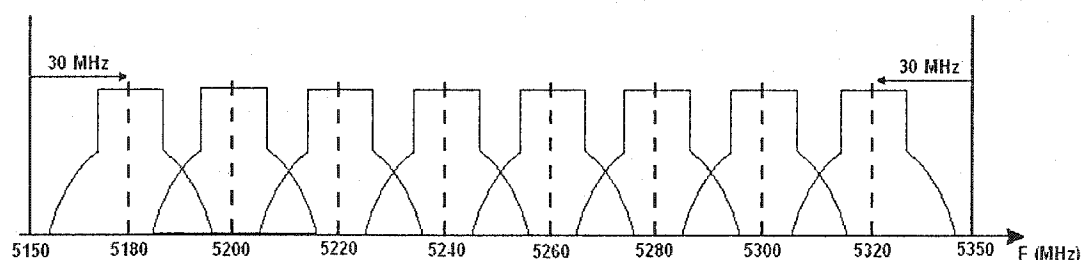


Figure A.7 Canaux OFDM

Après avoir développé les spécificités de la couche physique décrite dans le protocole 802.11, nous allons maintenant traiter de la couche liaison.

A.5 Couche liaison

La couche liaison est la deuxième couche dans le modèle de référence OSI. Elle spécifie les protocoles et les fonctions pour l'accès et le contrôle. Elle a la responsabilité de la gestion du transfert des données des couches supérieures au médium. Comme l'indique la figure 2.1, cette couche est composée de deux sous-couches : la sous-couche LLC (Logical Link Control) et la sous-couche MAC (Media Access Control). Dans ce qui suit, nous allons développer les spécificités décrites dans le protocole 802.11 de la couche liaison.

A.5.1 Services de la couche liaison

Trois services sont dispensés par la couche liaison au bénéfice des couches supérieures, ils sont exposés dans les prochains paragraphes.

A.5.1.1 Service de données asynchrones

Le service de données synchrones donne la possibilité à deux sous-couches LLC de deux machines d'échanger et de traiter des paquets de manière asynchrone. Certains paquets sont transmis d'une manière asynchrone, les *broadcast* et les *multicast* font partie de ce genre de paquet. Comme la communication n'est pas orientée connexion, la transmission de ces paquets se fait par le meilleur effort et donc il n'y a aucune garantie quant à la bonne réception des paquets. La qualité de service de ces derniers est inférieure à celle des paquets qui utilisent des acquittements pour confirmer la bonne réception. C'est pour cette raison que toutes les machines supportent ce service qui est dispensé par la sous-couche LLC.

A.5.1.2 Service de sécurité

Dans le protocole 802.11, la sécurité sur la couche liaison est assurée par le WEP (Wired Equivalent Privacy). Cependant ce service est limité à l'échange de donnée. Ce

service localisé dans la sous-couche MAC encrypte les MSDUs (*MAC Service Data Unit*) et assure les fonctions de confidentialité, d'authentification et du contrôle de l'accès. Le niveau d'encryption du WEP varie entre 1 et 128 bits.

A.5.1.3 Service de mis en ordre des MSDUs

Les services de la couche liaison permettent, et dans certains cas requièrent, le changement de l'ordre des MSDUs pour des soucis d'efficacité, de qualité de service ainsi que pour des raisons spécifiques, par exemple celui de la gestion de la puissance des transmissions. Cela a pour effet de changer l'ordre de transmission des trames. Ce service se charge de la gestion de ce mécanisme d'une façon transparente pour les autres couches.

Après avoir décrit les services offerts par la couche liaison, nous allons maintenant nous intéresser dans la prochaine section, aux différentes architectures disponibles dans cette même couche et qui sont définies dans le protocole 802.11.

A.5.2 Architectures

Le protocole 802.11 normalise deux architectures au niveau de la couche liaison. Se sont le DCF (Distributed Coordination Function) et le PCF (Point Coordination Function).

A.5.2.1 Le DCF

Le DCF est très populaire et utilisé par défaut dans les WLANs utilisant le protocole 802.11. Dans le DCF, il n'y a pas de monopole ou de priorité d'une station vis-à-vis des autres. Le contrôle de ce dernier est décentralisé. En d'autres mots, il incombe à chaque station voulant communiquer de déterminer, selon un certain processus, le moment où elle commencera à transmettre. Le processus d'accès au médium sera décrit dans la section A.5.3.

A.5.2.2 Le PCF

Le PCF comme son nom l'indique, consacre une machine pour être le contrôleur centralisé du trafic dans la cellule. Cette machine est en général l'AP. Ce dernier informe chaque station, dont il a la charge, du moment où elle peut transmettre. On peut assimiler cette architecture à un échange de jeton qui donne aux stations le droit de transmettre et que seul l'AP distribue. Le PCF a été introduit pour assurer une qualité de service pour certains types de trafic sensibles au délai comme la voix ou la vidéo. La méthode d'accès au médium du DCF ne tient à aucun moment compte du type du trafic en plus de ne pas être orientée connexion. La coexistence DCF-PCF est possible dans le protocole 802.11, dans un tel cas, le PCF reste prioritaire. Le mécanisme DCF se met en marche seulement lorsque le médium est libre.

A.5.3 Gestion du médium partagé

Dans un système DCF, l'émetteur transmet son paquet après avoir écouté le canal et suit certaines étapes. Cependant, à mesure que le nombre de transmissions augmente, les risques de collisions suivent le pas. En effet, si deux ou plusieurs stations, écoutent le canal pour savoir s'il est libre et qu'elles décident de transmettre en même temps, elles causeront certainement des collisions et devront donc reprendre la transmission de leur paquet respectif de donnée en entier. La durée de la collision correspond en fait à la différence entre le début de transmission du premier paquet et la fin de la transmission du bit, le plus tard, des stations concernées par cette collision. Durant cette période, le canal est inutilisable et la largeur de bande est perdue. À ceci s'ajoute un autre phénomène qui peut survenir et causer des collisions, c'est le problème des stations cachées. Ce problème se manifeste lorsque deux ou plusieurs stations sont assez éloignées les unes des autres pour être hors d'atteinte de leur rayon de transmission respectif. C'est-à-dire si l'une de ces stations est entrain d'émettre son paquet de donnée vers l'AP, le restant de ces stations ne peuvent pas constater que le canal est occupé car elles sont hors de portée du signal émis. Si l'une d'entre elles décide de commencer à

émettre à son tour vers le AP, au niveau de ce dernier une collision se produira et les deux paquets de données seront perdus. Dans le paragraphe qui suit, nous allons décrire la méthode d'accès CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance).

A.5.3.1 CSMA/CA

Le CSMA/CA est une méthode d'accès efficace dérivée du protocole ALHOA. Elle a beaucoup de ressemblance avec CSMA/CD (CSMA / Collision Detection) utilisée dans le protocole Ethernet. Le CSMA/CD se base sur le fait qu'une station donnée peut écouter toutes les autres stations présentes sur son segment afin de détecter les éventuelles collisions, ce qui n'est pas le cas dans les réseaux sans fil à cause du problème des stations cachées décrit précédemment. C'est la raison pour laquelle cette dernière méthode ne peut pas être utilisée dans un WLAN. Le CSMA/CA consiste essentiellement à faire une écoute continue de l'activité dans le médium, à s'abstenir de transmettre si le médium est occupé ou à transmettre après une période de contention aléatoire si le médium est libre durant un certain temps prédéterminé. Cette méthode résout les problèmes de collision potentiels dans les réseaux sans fil. Cependant, cette méthode n'est pas déterministe et ne garantit pas l'accès au médium ni le risque de ne pas avoir de collisions et ce principalement à cause de l'aspect aléatoire qu'elle englobe. Le CSMA/CA utilise ACK (ACKnowledgement paquet) si la transmission est reçue correctement. Le NACK (Nagative ACK) est implicite. En effet, si un ACK n'est pas reçu avant une certaine période prédéterminée, la transmission est considérée comme un échec et une retransmission est initiée. Le nombre de retransmissions est limité. Si le nombre maximal de retransmission est atteint, la couche liaison arrête ses tentatives et les couches supérieures sont informées de la situation. Dans ce qui suit, nous allons détailler les mécanismes de ce protocole, mais avant, nous devons donner quelques définitions utiles.

- DIFS (DCF Inter Frame Space) : c'est la période de temps durant laquelle le médium reste libre continuellement et après laquelle une station voulant communiquer peut initier la procédure d'accès au médium.

- EIFS (Extended Inter Frame Space) : c'est la période de temps à respecter, par une station voulant communiquer, après avoir détecté qu'une trame de la couche liaison en transmission est erronée. Par exemple, si le format de la trame n'est pas conforme ou si le champ de contrôle d'erreur indique une non-conformité.
- SIFS (Short Inter Frame Space) : c'est la durée prévue pour la réception et la transmission de paquets de la procédure d'échange concernant une source et sa destination.

Nous allons maintenant décrire d'une façon globale le mécanisme utilisé dans la méthode d'accès CSMA/CA. Une station voulant communiquer écoute le médium. Si ce dernier est occupé, alors elle attendra jusqu'à sa libération. Une fois que le médium est considéré comme libre, la station attend un DIFS ou un EIFS selon le cas. En suite, elle calcule d'une façon aléatoire une période de contention durant laquelle elle s'abstiendra encore de transmettre. Cette période est appelée Contention Window. Sa longueur est déterminée par un algorithme appelé *backoff*. Nous détaillerons cet algorithme plus loin. La figure A.8 illustre le mécanisme dans le CSMA/CA.

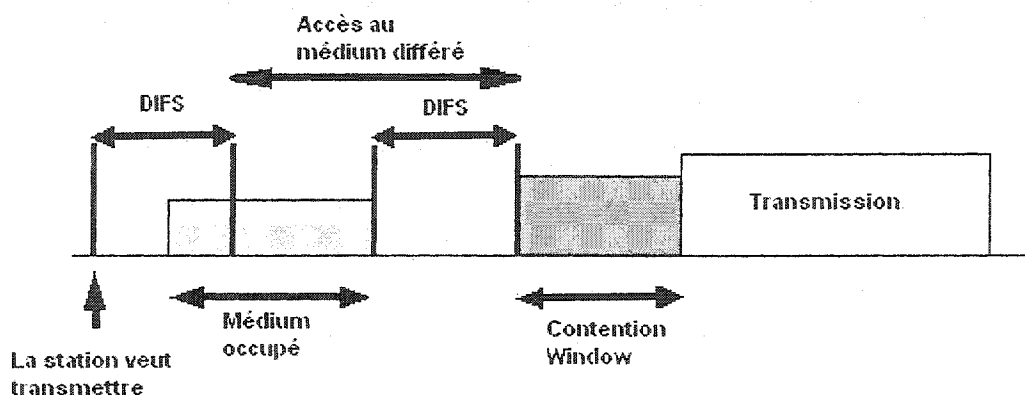


Figure A.8 Mécanisme utilisé dans CSMA/CA

La période de contention s'exprime en nombre d'unité de temps ou *Time Slot*. Un compteur spécifique décrémente cette valeur jusqu'à atteindre la valeur zéro. Si durant cette décrémentation, une activité est détectée dans le médium, le décompte est arrêté. Il reprendra après que le médium devient disponible et dès qu'un DIFS ou un EIFS se soit écoulé. La figure A.9 illustre ce mécanisme.

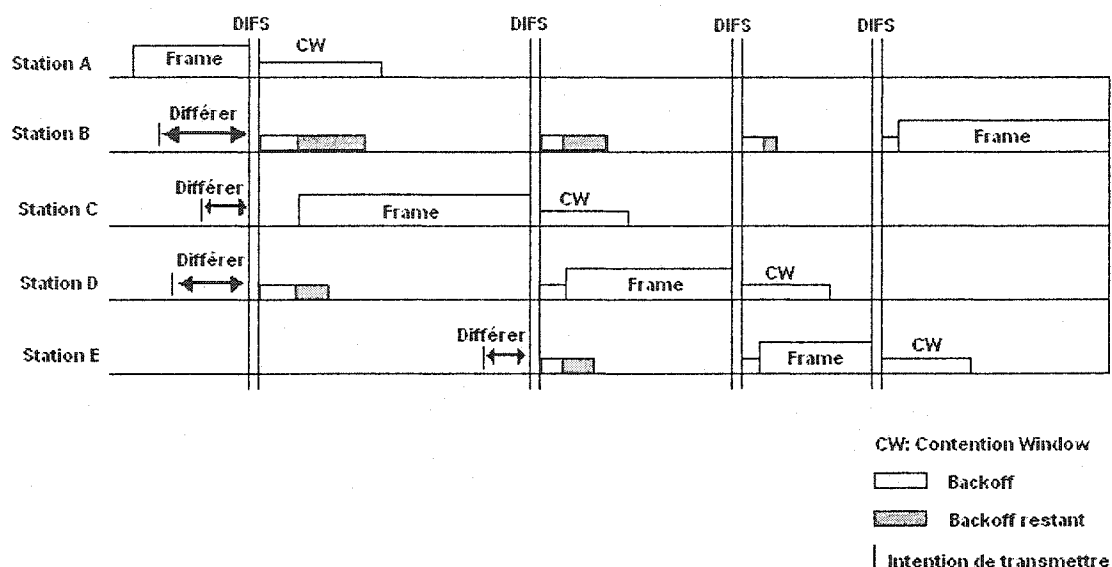


Figure A.9 Illustration du mécanisme du backoff

Une option intéressante est aussi décrite dans le protocole 802.11, c'est la procédure d'échange de RTS/CTS (Request To Send / Clear To Send). Elle est présentée dans la section qui suit.

A.5.3.2 RTS/CTS

Pour minimiser les risques de collisions, une réservation du canal serait plus appropriée pour optimiser l'utilisation du médium partagé, surtout dans des situations où le trafic est important. Une option est souvent utilisée pour répondre à ce besoin; elle consiste à un échange de messages RTS/CTS entre l'émetteur et le récepteur. L'accès au médium partagé est fait en utilisant CSMA/CA, cependant, au lieu d'envoyer

directement le paquet de donnée au récepteur, l'émetteur transmet à ce dernier un court paquet de réservation (RTS) et attend la confirmation (CTS) provenant du récepteur pour commencer à envoyer le paquet de donnée. La procédure de ces échanges est illustrée dans la figure A.10. Nous détaillerons ces échanges dans la prochaine section. Les champs d'un paquet RTS sont présentés dans la figure A.11.

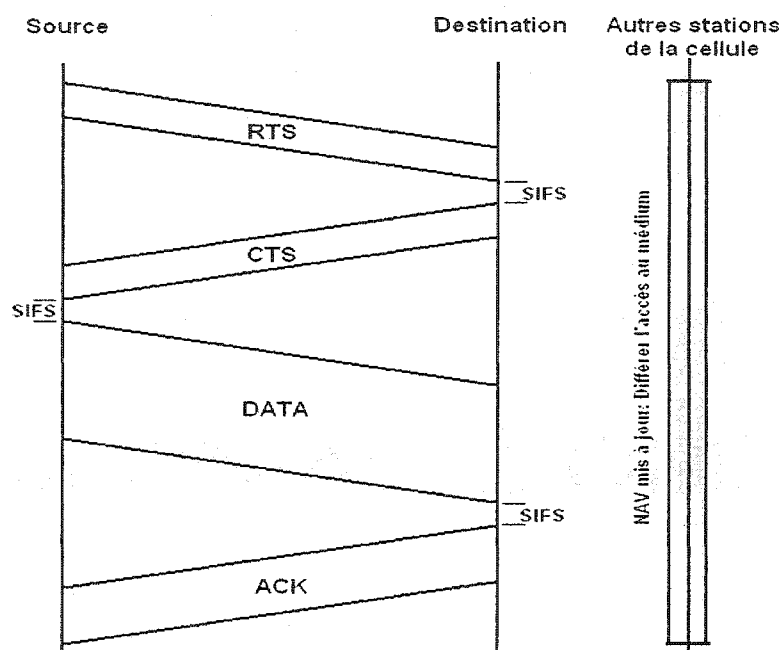


Figure A.10 Échanges entre une source et sa destination

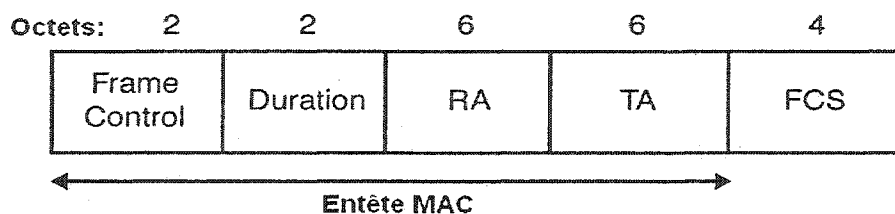


Figure A.11 Paquet RTS

Un paquet RTS contient donc les champs suivants.

- *Frame Control* : ce champ contient plusieurs informations comme la version du protocole utilisé, son sous-type (donnée, gestion, etc.), des détails sur la fragmentation, l'encryption, la gestion de la puissance, des informations de contrôle etc. La figure A.12 montre les différentes composantes de ce champ.
- *Duration* : la durée totale prévue pour la transmission en microsecondes incluant la durée de transmission du paquet de donnée en attente, la durée du CTS, de l'ACK, en plus de trois intervalles de durée SIFS comme on peut le constater dans la figure A.10.
- RA (Receiver Address) : l'adresse de la station réceptrice.
- TA (Transmitter Address) : l'adresse de la station émettrice, en l'occurrence la station elle-même.
- FCS (Frame Check Sequence) : séquence de contrôle portant sur tous les champs décrits plus haut, afin de constater et le cas échéant réparer une erreur survenue dans le paquet.

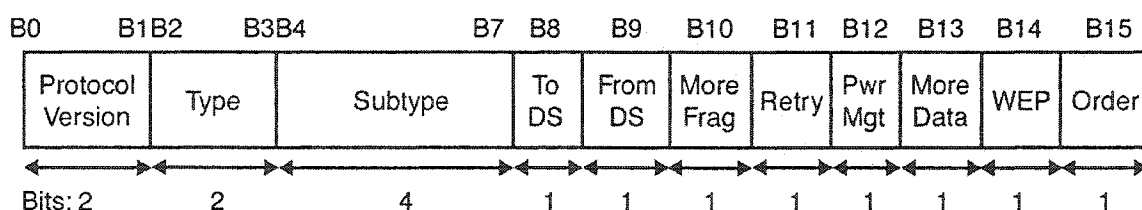


Figure A.12 Composantes du champ Frame Control

Au niveau du récepteur, si le RTS est reçu avec succès, un CTS est émis. La figure A.13 expose les champs d'un paquet CTS. Un paquet CTS contient les champs suivants.

- Les champs *Frame Control* et FCS sont similaires à ceux du paquet RTS.
- RA : ce champ est la copie du TA reçu dans le RTS précédant, c'est à dire l'adresse de la station qui a initié la communication.

- *Duration* : la durée de transmission. Elle est égale à la durée calculée et envoyée dans le RTS par l'émetteur moins la durée d'envoi du CTS et d'un intervalle SIFS.

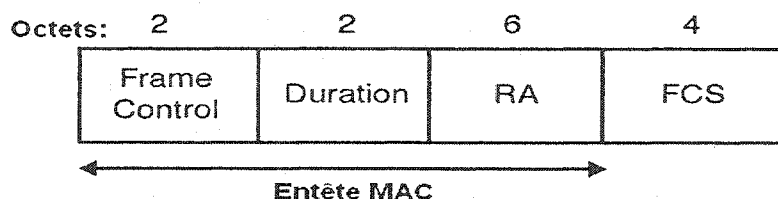


Figure A.13 Format d'un paquet CTS

Après un échange réussi de RTS/CTS, l'émetteur transmet son paquet de donnée. La figure A.14 expose les champs de ce paquet. Les champs de ce paquet sont les suivants.

- Les champs *Frame Control* et *FCS* sont similaires à ces des paquets CTS et RTS.
- *Duration* : ce champ prend la valeur zéro si le paquet est envoyé en multicast, la valeur de la durée en microseconde d'un ACK plus un SIFS si la trame n'est pas fragmentée ou enfin, la durée d'un ACK plus celle du fragment suivant plus trois SIFS si un autre fragment de la trame devait suivre.
- Les champs *Address 1, 2, 3 et 4* sont présentés dans le tableau A.2. BSSID (BSS Identifier) est l'identification du réseau.
- *Sequence Control* : contient deux informations, le numéro de la séquence et le numéro du fragment
- *Frame Body* : contient généralement le MSDU (Mac Service Data Unit), c'est-à-dire les données à transmettre.

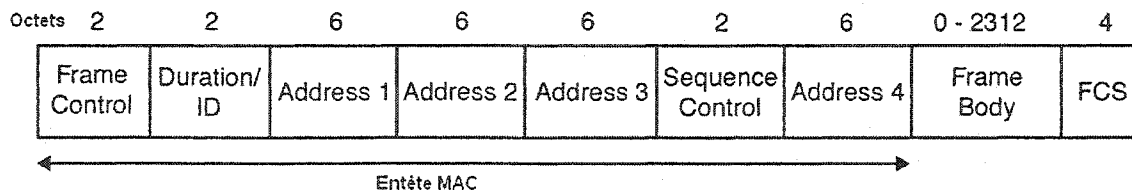


Figure A.14 Format d'un paquet de donnée

Tableau A.2 Champs d'adresses

To DS	From DS	Address 1	Address 2	Address 3	Address 4
0	0	DA	SA	BSSID	N/A
0	1	DA	BSSID	SA	N/A
1	0	BSSID	SA	DA	N/A
1	1	RA	TA	DA	SA

To DS et *From DS* sont deux bits du champ *Frame Control* (figure A.12). SA (Source Address) et DA (Destination Address) sont respectivement l'adresse de la source et l'adresse de la destination. Dans les WLANs, il faut faire la différence entre l'adresse de la source et l'adresse de l'émetteur (AS et TA). En effet, lorsqu'une station reçoit un paquet, le TA est toujours l'adresse de l'AP mais la vraie source peut être une autre station. De la même façon, il existe une différence entre l'adresse du destinataire et l'adresse du récepteur (DA et RA). Lorsqu'une station transmet, son RA est toujours l'adresse de l'AP mais sa destination finale peut être une autre station. Quand le paquet de donnée a été bien reçu au niveau du récepteur, ce dernier transmet un ACK. La figure A.15 expose les champs d'un paquet ACK.

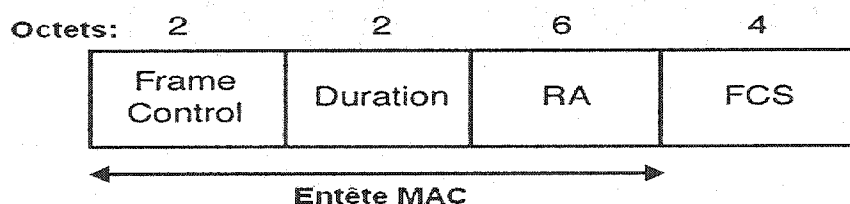


Figure A.15 Format d'un paquet ACK

Les champs de ce paquet sont les suivants.

- Les champs *Frame Control* et FCS sont similaires à ces des paquets CTS et RTS.
- *Duration* : c'est la durée en microseconde extraite du paquet de donnée moins le temps de transmission de l'ACK et moins un SIFS.

- *RA* : cette valeur est copiée du champ de *Address 2* du paquet de donnée.

Dans l'architecture que nous décrivons, où tous les paquets émis par les stations mobiles passent par l'AP, le problème des stations cachées n'intervient que durant la phase de transmission du RTS. En effet, une station éloignée, peut ne pas constater qu'un RTS est en cours de transmission et décide d'envoyer le sien causant ainsi la perte des deux RTS. Cependant, lorsque l'AP, en réponse à un RTS, envoie un CTS, ce dernier est aussi reçu aussi par toutes les autres stations de la cellule. En effet, par définition, une station ne peut être associée à un AP que si elle reçoit des messages de qualité satisfaisante de ce dernier, par exemple les *Beacons*. Le CTS, contenant la durée prévue de transmission, et étant reçu par toutes les stations, celles, parmi ces dernières qui avaient l'intention d'émettre, devront s'abstenir durant la période indiquée et ce même si elles constatent que le canal est libre. Ceci est fait en mettant à jour leur NAV (Network Allocation Vector) grâce au champs *Duration* du CTS et ce en respectant les règles des fonctions de coordination décrites dans le DCF. De plus, le RTS étant un paquet de petite taille, les risques de collision sont très faibles comparativement à ce qu'ils sont pour un paquet de donnée. Cependant, dans le cas d'un réseau peu achalandé ou dans le cas d'échange de paquets de donnée de petite taille, les entêtes et les paquets échangés prévus dans le mécanisme RTS/CTS peuvent diminuer l'efficacité de l'utilisation du médium et donc détériorer le rendement du réseau. C'est la raison pour laquelle le mécanisme RTS/CTS reste une option dans le protocole 802.11. Dans la section qui suit, nous allons détailler l'algorithme de *backoff* qui estime la durée de contention que devra respecter l'émetteur avant de commencer à transmettre.

A.5.3.3 Algorithme de backoff

Comme nous l'avons expliqué précédemment, l'algorithme de *backoff* sert à calculer la période durant laquelle la station émettrice devra s'abstenir de transmettre. Dans le cas où deux ou plusieurs stations veulent communiquer dès que le médium se libère, un accès aléatoire servira à diminuer le risque de collision. En effet, après une

attente d'une période DIFS ou EIFS selon le cas, toute station désirant communiquer générera aléatoirement suivant une distribution uniforme un nombre noté R . La probabilité que deux ou plusieurs stations choisissent la même valeur de R est relativement petite. Cette valeur sera comprise dans un intervalle de bornes 0 et CW , où CW est une valeur comprise entre $aCWmin$ et $aCWmax$. La période de contention sera donc égale à R fois durée d'une unité de temps (*Time Slot*). Un compteur décrémentera la valeur de R durant les unités de temps où il n'y a pas d'activités dans le réseau. Dès qu'il arrive à zéro, le paquet de donnée en attente est transmis. La première tentative de transmission commence avec un CW égal à $aCWmin$. À Chaque nouvelle tentative de retransmission, la valeur de CW est incrémentée. Par exemple à la $k^{ième}$ tentative, CW prendra la valeur $2^{k+n} - 1$. Où n représente le nombre qui exprime $aCWmin$: $aCWmin = 2^n - 1$. si $2^{k+n} - 1$ est supérieure à $aCWmax$, CW restera égale à $aCWmax$. Si la transmission réussie, CW est réassignée à $aCWmin$. La figure A.16 montre l'incrémentation exponentielle de la valeur de CW .

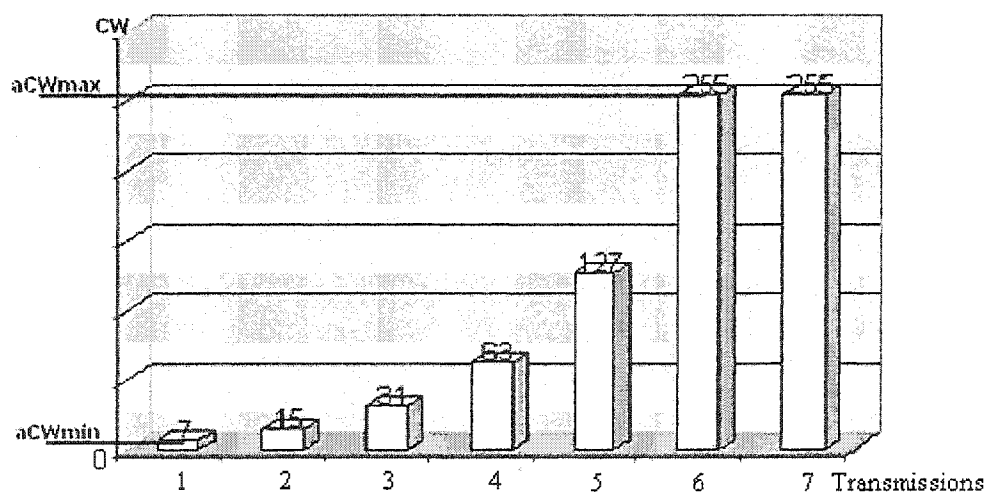


Figure A.16 Incrémentation de la valeur de CW

A.5.3.4 Procédure d'accès au médium partagé

La figure A.17 en détail la procédure d'accès au médium.

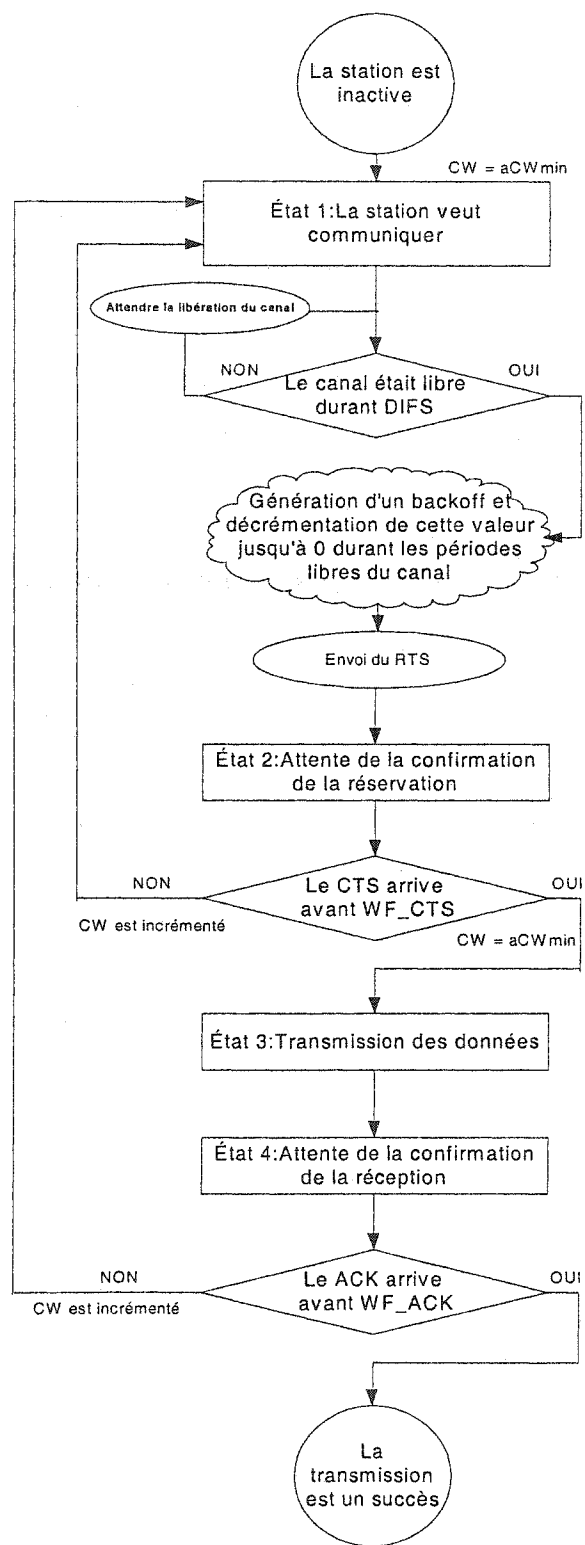


Figure A.17 Procédure d'accès au médium partagé